

# 基于免疫系统的非常规突发事件风险识别模型<sup>①</sup>

杨 青, 刘星星, 陈瑞青, 蔡文涛  
( 武汉理工大学管理学院, 武汉 430070)

摘要: 非常规突发事件的风险识别是应急管理的关键科学问题之一, 由于理论研究和实践应用中常常面临“无真可仿”的局面, 使得风险识别成为亟待解决的难题. 本文综合运用免疫学理论、复杂适应系统涌现理论和计算实验技术, 提出了风险识别器抗体向非常规突发事件抗原进化的理论, 建立了风险识别的亲密度、抗原清除效果、风险识别器数量和能量等识别标准体系及其模型, 采用识别亚非常规突发事件和各类事件组合关系以及它们的涌现来无限接近地认识非常规突发事件的研究思路, 通过计算实验和算例分析, 验证了研究成果的科学性和可行性.

关键词: 非常规突发事件; 风险识别; 免疫系统; 计算实验; 涌现

中图分类号: C931; X913.4 文献标识码: A 文章编号: 1007-9807(2015)04-0049-13

## 0 引 言

非常规突发事件是指前兆不充分, 具有明显的复杂性特征和潜在的次生衍生危害, 而且破坏性严重, 采用常规管理方式难以有效应对的突发事件<sup>[1,2]</sup>. 风险识别及其监测预警是应急管理的关键科学问题之一<sup>[3-5]</sup>. 非常规突发事件具有“情景依赖”性, 构建“情景-应对”模式已经广泛被应急管理学术领域认同<sup>[6]</sup>. 建立“情景-应对”型非常规突发事件风险识别与评估模型, 有利于理解风险性质和确定风险等级, 加强突发事件风险分析工作, 充实完善突发事件监测、预警与应急辅助决策的方法和手段, 提高政府应急管理科学化水平.

突发事件情景构造实质上是危害识别和风险分析过程. 情景重构与规划是风险识别与评估的基础. 当前, “情景-应对”型非常规突发事件模型的研究主要围绕情景构建与演化而开展, 主要分为信息处理、演化规则与模拟仿真三个方

面<sup>[7-10]</sup>. 这些方法体系之间也在不断融合, 体现了多学科融合的特点. 然而, 由于非常规突发事件信息存在多源异构且海量分散的特点, 目前的情景构建与风险识别多应用于具体领域或事件, 例如洪灾<sup>[11]</sup>、金融危机传染的识别<sup>[12]</sup>等, 难以构建普适模型与范式.

多学科综合集成研究非常规突发事件是学科前沿, 将管理科学与生命科学等学科紧密结合是非常规突发事件研究未来努力方向之一<sup>[4]</sup>. 人类免疫系统经过生物进化被证明是有效的、适应性良好的防御系统<sup>[13]</sup>, 也是一种大规模平行自适应信息处理的系统. 就生物机理而言, 自然免疫系统与非常规突发事件应急管理所面临的问题极为相似, 自然免疫系统在人体内防御异物入侵的过程就是一个不断识别风险和和处理风险的过程<sup>[13,14]</sup>. 但是当前以免疫系统作为参考体系的突发事件应急管理研究鲜见. 本文借鉴免疫系统信息识别机制, 将非常规突发事件模拟成抗原, 依据

① 收稿日期: 2013-06-04; 修订日期: 2014-08-25.

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划培育项目(91024020); 湖北省协同创新中心开放项目(JD20150105); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2013-YB-020).

作者简介: 杨 青(1962—), 男, 广东大埔人, 博士, 教授, 博士生导师. Email: yangq@whut.edu.cn

免疫反应原理 构建抗体风险识别模型 为探究非常规突发事件的免疫反应与风险识别提供新方法 丰富突发事件应急管理研究体系.

### 1 理论假设

#### 1.1 非常规突发事件风险识别和预控系统与生物免疫系统类比假设

非常规突发事件应急管理系统是社会经济系统的子系统 社会经济系统是人、物、信息等要素通过某种规则而相互关联的动态整体 各种要素之间形成一定的层次或网络结构 并且这种结构随系统的演化而不断变化 会呈现出复杂的“涌现”现象<sup>[15]</sup>. Haldane 等提出复杂适应系统理论 (complex adaptive system) 认为复杂性是一种“隐秩序”以及系统的“涌现性” 复杂适应系统中主体的适应性造就了复杂性. 复杂适应系统理论可以应用于非常规突发事件风险识别研究<sup>[16]</sup>.

非常规突发事件的演化过程与因素之间的作用关系具有非线性特点 也具备复杂系统的“涌现”特征. 非常规突发事件演化是典型的开放复杂巨系统<sup>[3]</sup> 而免疫系统也是一个开放的复杂巨系统 可以将免疫系统作为一个参考体系 用以研究社会领域的管理问题 例如 Haldane 等学者<sup>[17]</sup> 在 Nature 上发文 提出了金融风险管理中的“免疫”思想. 另外 社会计算“模拟”思想、复杂适应系统“意外建模”思想等都为建立全新的应急管理

理模式提供了全新而可能的科学基础 将拓宽应急管理的科学思维 形成新的管理思想、理论、模式、方法 从而有力推动应急管理科学、乃至整个管理科学的发展<sup>[18]</sup>. 当前 关于人工免疫系统及其应用研究日趋成熟 被应用于多个领域<sup>[19,20]</sup> 但以免疫系统作为参照系 分析突发事件风险的研究较少.

在自然进化条件下 免疫系统是一个稳健可靠的防御系统. 免疫系统的总体性能是许多执行微小而特殊任务的个体之间发生相互作用而“涌现”的产物. 免疫系统实际是一个巨大的、复杂的、高度协调的通信系统<sup>[21]</sup>. 杨青等<sup>[14,22]</sup> 在总结借鉴免疫学、多 Agent 建模和仿真、应急管理理论和方法的基础上 建立了基于免疫学的应急预案多智能系统理论框架以及风险识别模型.

抗原具有异物性、特异性和大分子性的外源性物质<sup>[21]</sup>. 抗原对免疫系统造成了危险 免疫系统则产生免疫反应<sup>[13]</sup> 正如突发事件给社会经济系统所造成的风险. 本文假设抗原 Agent 代表非常规突发事件风险 是风险识别 Agent 和预控方案 Agent 针对的对象; 风险识别器 Agent 和预控方案 Agent 将针对特异性的非常规突发事件风险分别生成 并通过克隆选择作用 不断淘汰“亲和度”低的 补充进新的“亲和度”更高的 直至获得进化的最优的风险识别器和预控方案. 非常规突发事件风险识别和预控系统模拟计算实验模型与生物免疫系统的映射如表 1 所示.

表 1 非常规突发事件风险识别和预控系统与生物免疫系统映射表<sup>[14,22]</sup>  
Table 1 Mapping table on risk identification & pre-control system of unconventional crisis with biological immune system<sup>[14,22]</sup>

	生物免疫系统	风险识别和预控系统
多 Agent	抗原	非常规突发事件危害与风险
	抗体*	风险识别模型 预控方案
系统机能	B 细胞增殖分化 生成记忆细胞	记忆学习
	抗原捕获、降解、提呈及识别	监测预警
	抗体产生或由记忆细胞留存	风险识别模型和预控方案生成
	抗体交叉、变异、克隆选择	风险识别模型和预控方案自学习、进化、优化
系统维持	清除抗原 免疫自稳	风险控制

注: \*代表抗体取广义概念 包含 B 细胞、T 细胞以及免疫球蛋白的功能.

#### 1.2 非常规突发事件抗原进化理论假设 假设(非常规)突发事件为抗原 其进化过程

如图 1 所示. 事件作为抗原 致灾因子或基因来自于自然灾害、事故灾难、公共卫生、社会安全等

事件,通过基因提取后形成该事件的特质基因,经过蔓延、衍生、耦合不断扩散与变化等演化机理将情景推演为各类复杂事件,其中特质基因一般指

能表征非常规突发事件特点的基因片段,非常规突发事件的风险识别则依靠特质基因片段识别某一特定领域或阶段的非常规突发事件<sup>[23]</sup>。

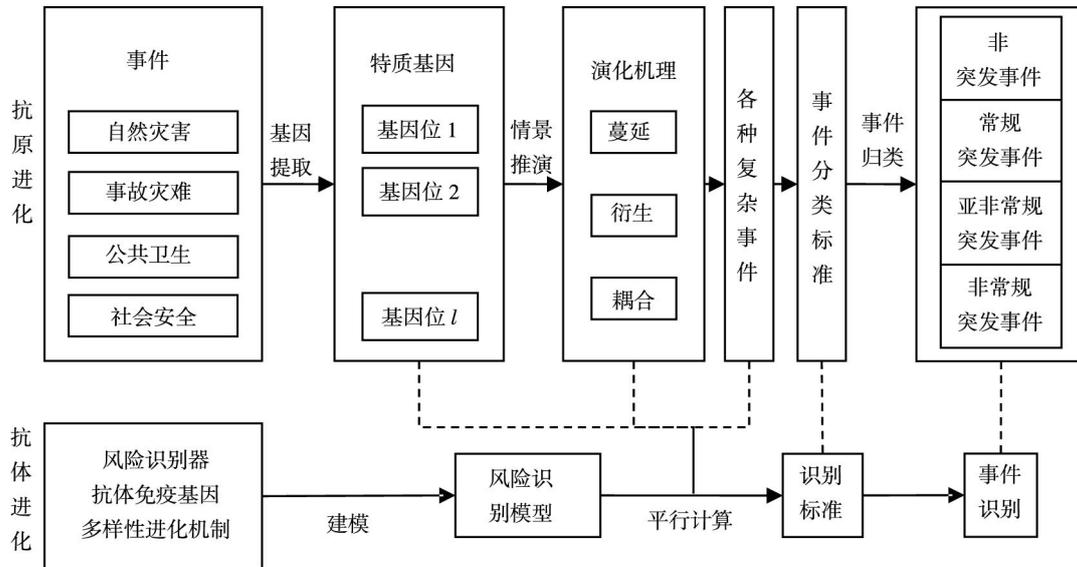


图 1 风险识别器抗体向非常规突发事件抗原进化示意图

Fig. 1 Schematic diagram about the evolution from the antibody of risk recognizer into the antigen of unconventional crisis

非常规突发事件的难以预测性说明其事件基因可测性较低,征兆显性程度极低。要探究非常规突发事件外在表现的深层原因,必须探索决定其表现的基因,认识其基因特质与演化规律。从多学科融合角度,用免疫复杂巨系统模拟非常规突发事件应急管理,可以将免疫基因位串每一位设置为各个事件对应的指标。

频率低、缺乏应急管理经验和预案、常规应对方法效果不理想的事件<sup>[24]</sup>。当前新形势下的非常规突发事件应急管理问题异常复杂<sup>[3]</sup>,非常规突发事件往往受多种影响要素综合作用,其发生、发展、转化与演化方式多变且难以准确界定<sup>[25]</sup>。非常规突发事件情景具有涌现性,而涌现性是一个系统作为一个整体而表现的性质,不能由任何系统的组成部分来单独描述其特征<sup>[26]</sup>。非常规突发事件难以预测,目前较为可行的研究方法是通过识别亚非常规突发事件和各类事件非线性组合关系以及它们的涌现来无限接近地认识非常规突发事件。

复杂系统的实现可以通过某些要素或子系统的设置,自下而上涌现出高层次复杂性<sup>[15]</sup>。本文采取系统归纳的方法,总结出非常规突发事件的共同特征,作为非常规突发事件的特质基因,主要包括社会性、发生概率、破坏性、过程复杂性、演化速度、延续时间、影响范围、控制难度、连锁反应等<sup>[23,24]</sup>。基因的提取即是突发事件信息监测与处理,根据统计数据与概率分布,设置基因位串的每一位对应着不同类型的事件的识别指标,通过情景假设,进行平行演化,发现演化规律,从而“涌现”出非常规突发事件的特点与本质。

### 1.3 风险识别器抗体进化的理论假设

根据事件分类标准,可将事件重新分为非突发事件、常规突发事件、亚(准)非常规突发事件、非常规突发事件,其中亚(准)非常规突发事件是介于非常规突发事件与常规突发事件之间、发生

假设风险识别器为抗体,其进化过程如图 1 所示。免疫系统防御异物入侵的过程,就是一个不断识别风险和处理风险的过程<sup>[13]</sup>。免疫学研究已经证明每一个类型的抗体都有特定抗原决定基,抗体识别抗原主要通过抗体决定基与抗原决定基之间的模式互补匹配,抗体与抗原之间的匹配模式越接近,识别效果越好。免疫系统对抗原采取的不是以静制动的策略,而是以变应变或者通过超变异产生尽可能多的抗体类型的策略。在

免疫系统中,免疫球蛋白(Immunoglobulin, Ig),即抗体,由 $10^6 \sim 10^{16}$ 个不同的基因片段通过基因重组和基因突变产生抗体。抗体是三维Y形状分子,由重链和轻链组成,每一条链具有两类基因编码,一类为恒定区C区,数量只有一个,负责许多效应功能,如补体固定。另一类为可变区V区(由V、D、J三类基因片段组成),数量可能在几百以上,负责抗原识别。V区是突变发生的集中区,是免疫多样性的主要来源,而多样性保证免疫系统可以不断适应外部各种抗原类型<sup>[21]</sup>。

风险识别器如同抗体,其基因来自基因库的基因重组与突变,产生重链,基因片段以严格的顺序拼接,将可变区与恒定区结合在一起,从而产生多样抗体,以识别各类抗原。本文通过风险识别器建模与平行计算,构建具备多样性与遗传性的风险识别器,模拟抗原进化的情景推演过程,并依据计算试验构建识别标准,从而与事件分类标准对接,达到事件分类识别的目的。

#### 1.4 风险识别器抗体向非常规突发事件抗原进化的理论假设

假设非常规突发事件的识别过程是抗体向抗原进化的过程(参见图1)。Kim和Bentley等认为人体免疫系统采用了“抗体”向“抗原”进化的策略<sup>[19]</sup>。为研究免疫复杂系统的行为,通常以免疫细胞或分子的浓度(concentration)或数量以描述系统的状态<sup>[21, 27]</sup>。复杂适应系统中主体的适应性造就了复杂性。免疫反应中浓度主要涉及的是抗原(突发事件)与抗体(风险识别器)的数量,而抗原与抗体的亲和力是调控浓度主要运算因子,也是系统具备自适应特性的基础<sup>[27]</sup>,故本文采用亲和力、抗原数、风险识别器数量作为风险识别指标。但风险识别模型缺乏一个指标直观描述系统状态,本文则引入能量<sup>[28]</sup>指标作为直接描述系统

状态的指标。这样就形成了包括亲和力、抗原数、风险识别器数量以及风险能量的科学体系。

本文运用免疫复杂巨系统的免疫原理,结合信息熵理论,构建非常规突发事件风险识别模型,通过平行计算,实现风险识别器抗体向非常规突发事件抗原进化。一是要识别事件抗原的特质基因,发现事件抗原的演化规律,还原各种复杂事件情景;二是要建立识别标准,主要包括:

1) 亲和力 亲和力是基于抗体与抗原之间的结构相似性、通过距离与匹配模式等算法获得,亲和力越高说明抗体的识别效果越好。

2) 抗原清除效果 突发事件抗原是动态变化的、会产生突变,每周期都会产生一定数量的新抗原。风险识别器抗体,在亲和力满足一定阈值的情况下,会消除抗原。抗原灭失的越快,波动的范围与频率越少,说明系统清除的效果越好,突发事件得到了有效的控制。

3) 风险识别器数量 风险识别器是识别抗原的有效抗体,其数量表示在某一亲和力下,系统拥有的抗体数量。一般情况下,抗体数量越多说明事件越严重、抗原风险越大、需要动用更多的应急资源。

4) 能量 突发事件的内在原因是内部能量的积聚,演化过程是能量的传递、积累直至突然大规模释放的过程<sup>[28]</sup>。通过计算演化,模拟某一时段的突发事件系统能量波动,将系统的能量值及其演化曲线作为判断事件风险的主要依据。

由于非常规突发事件具有罕见性、复杂性以及难以预测等特点,非常规突发事件的情景构造实质上是危害识别和风险分析过程,本文的主要工作是将非常规突发事件风险与免疫系统进行映射,发掘突发事件的免疫反应特点,从而作为识别事件的标准参考体系(如表2所示)。

表2 基于免疫系统的非常规突发事件风险识别指标内涵

Table 2 Connotation of risk identification index in unconventional crisis based on immune system

免疫系统反应指标	事件风险识别内涵
亲和力	预控方案有效性和可行性
抗原清除效果	事件灾害防御效果
风险识别器数量	应急的资源需求量
能量	事件灾害级别和应急管理紧迫性

## 2 模型构建

### 2.1 亲和度

假设抗体 ( $ab$ ) 和抗原 ( $ag$ ) 同构, 用二进制位串表示基因, 包括自体 (表示系统本身的元素)、识别器 (抗体) 和非自体 (抗原), 均为长度为  $l$  的二进制位串组合. 抗体和抗原的亲和度与它们之间的距离相关, 可以采用 Hamming 距离计算. 亲和度  $D_t$  计算如公式 (1).

$$D_t = \sum_{i=1}^l \delta_i \begin{cases} \delta_i = 1 & ab_i \neq ag_i \\ \delta_i = 0 & otherwise \end{cases} \quad (1)$$

式中  $D_t$  为第  $t$  周期的亲和度. 每周期亲和度的计算采取转轮算法, 首先设定初始亲和度  $Q_0$ , 而后以上一周最亲亲和度作为基数, 本周期亲和度大于上一周期时, 则当前值设为最亲亲和度, 否则保留上一周期值.  $ab_i$  和  $ag_i$  分别为抗体基因和抗原基因位串第  $i$  位的取值;  $\delta_i$  为  $ab_i$  和  $ag_i$  的距离.

### 2.2 抗原数

$$N(ag)_t = N(ag)_{t-1} - M(ag)_{t-1} + A(ag)_t \quad (2)$$

式中  $N(ag)_t$  为第  $t$  周期抗原数量;  $M(ag)_{t-1}$  为  $t-1$  周期消除的抗原数量. 若抗体与抗原结合的亲和度高于阈值  $\lambda$ , 则消除该抗原;  $A(ag)_t$  为每周新产生的抗原, 在此为常数  $C_1$ .

### 2.3 风险识别器数量

风险识别器通过自体耐受检验后, 与抗原结合, 消灭抗原, 而后进行克隆选择, 将具有高亲和度的风险识别器克隆, 并遗传到下一周期. 低亲和度的风险识别器则灭失, 下一周期产生固定数量的随机风险识别器.

$$N(ab)_t = N(ab)_{t-1} - M(ab)_{t-1} + A(ab)_t \quad (3)$$

式中  $N(ab)_t$  为第  $t$  周期抗体数量;  $M(ab)_{t-1}$  为第  $t-1$  周期亲和度小于阈值  $\lambda$  的抗体数量, 这些抗体将被淘汰.  $\lambda$  值可依据每周最亲亲和度动态变化;  $A(ab)_t$  为每周新产生的抗体, 公式如下

$$A(ab)_t = \sigma \cdot (m - M(ab)_{t-1}) + C_2 \quad (4)$$

式中  $m$  为周期内抗体的数量;  $\sigma$  为克隆系数;  $C_2$  为

每周期抗体增长数, 在此模拟免疫系统的抗体多样性, 新型抗体的产生主要来自于淘汰抗体的突变, 故不产生新的随机抗体.

### 2.4 风险能量

为表达基因序列的风险识别作用, 本文引入信息熵, 说明风险识别器的信息量. 一个系统越有序, 熵就越低, 而系统中变量的不确定性越大, 熵也就越大. 抗体浓度和 B 细胞数 (主要的抗体细胞) 等免疫系统参数的波动性可以用于构建一个稳定网络<sup>[27]</sup>.

本文在 Li<sup>[29]</sup> 建立的免疫网络风险模型上, 融合信息熵理论, 将抗体浓度转变为基因序列的信息熵, 基于免疫信息熵的系统风险能量模型如公式 (5) 所示.

$$E_t = \frac{2}{1 + e^{-\sum_{k=1}^{N_s} (I_k - I_T)}} - 1 \quad (5)$$

式中  $E_t$  为第  $t$  周期具有最优亲和度的抗体所具有的能量;  $N_s$  表示基因分类数;  $I_k$  表示  $N_s$  中第  $k$  个位串的信息熵, 表征事件基因的混沌程度, 见公式 (6), 当  $l$  大于  $e$  (自然对数) 时,  $I_k$  的值域随  $l$  增长而扩大;  $I_T$  表示  $T$  周期内平均信息熵, 见公式 (7);  $T$  为已模拟周期数.

$$I_k = -\frac{1}{\ln l} \sum_{i=1}^l p_i \ln p_i \quad (6)$$

$$(k = 1, \dots, N_s; i = 1, 2, \dots, l)$$

$$I_T = \sum_{t=1}^T I_k / T \quad (7)$$

式中  $p_i$  是第  $i$  个基因的表征值的数量在整个事件中同位置基因值总数量中所占的比值, 表示该类基因出现的概率, 计算公式如下

$$p_i = \frac{\sum_{j=1}^n g_{0,i} \wedge g_{j,i}}{n} \quad (i=1, \dots, l; j=1, \dots, n) \quad (8)$$

式中  $\neg$  表示非运算;  $\wedge$  表示异或运算;  $g_{j,i}$  表示第  $j$  个抗原中第  $i$  位基因取值;  $g_{0,i}$  表示当前抗原第  $i$  位的基因值. 当  $p_i$  为零时, 表明出现检测盲点.

为展现能量演化趋势, 采用系统周期平均能量作为衡量因素, 如公式 (9) 所示.

$$E_A = \sum_{t=1}^T E_t / T \quad (9)$$

式中  $E_A$  表示距当前周期系统运作过程中平均能量.

一般免疫算法分为信息熵免疫算法与距离免疫算法<sup>[21]</sup>,本文则以距离作为免疫反应机理,信息熵作为系统能量运机理,将二者融合,共同反映系统状态,体现出更为科学的特点.本文提出的模型中所采用的指标输入数据是以二进制位串表示,在实际应用中可以根据不同危害,设置不同的临界状态作为阈值,通过对每一位串指标分层细化为粒度更小的信息单元,使得指标输入数据更为全面的反应实际情况,而通过平行计算的方法可以为复杂社会问题研究提供完整解决方案<sup>[25]</sup>,体现出了本文提出模型的可拓展性与完备性.

### 3 模拟计算实验

#### 3.1 模拟过程

基于多 Agent 建模的人工社会系统模拟仿真是一种解决复杂社会系统的有效方法,非常适合用于突发事件的动态模拟仿真.本文通过对突发事件的模拟,探究上述理论假设和模型的科学性和可行性.

借鉴“人工社会 + 计算实验 + 平行执行”(ACP)思想<sup>[15,25]</sup>在虚拟环境下,数据计算同步运行,以免疫系统作为平行执行的体系,以模糊的统计数据(漏报率  $q$ 、基因分类数  $N_s$ 、基因长度  $l$  等)计算出事件的免疫反应特性,得到各个识别指标的演化图谱,从而转变为综合识别标准.本模拟实验以混合的免疫遗传算法为基础,具体模拟过程伪代码如下:

Procedure 突发事件风险识别模拟

Begin

$t = 0;$

初始化: 随机产生一定数量的一般性抗原,通过变异与交叉,转变为具有特性的抗原;

While  $t <$  模拟总周期 do

Begin

产生少量随机抗原并发生突变;

产生固定数量的抗体;

转轮算法,抗体与抗原结合,亲和度计算;

If(本期最优亲和度  $<$  上一周期最优亲和度) Then 该抗体灭失 Else 克隆选择该抗体并遗传,清除抗原;

获取残留抗原数量、保存抗体数量、保存最优亲和度、计算能量  $E$  和  $E_A$ ;

$t = t + 1;$

End

End

#### 3.2 计算实验

根据免疫基因原理,由于基因识别区主要由 V、D、J 三类基因片段组成,故  $N_s$  设为 3;二进制位串长度  $l$  暂设置为 9,漏报率  $q$  统一取值为 0.01,表示基于现有技术水平与管理手段,仍有 1% 的事件未能识别是难以避免的.  $l$  取值长度变化与位串指标以及指标仿真长度呈正向关系,其中位串的某一位值为 0 则表示该位串所表征的指标未达到阈值,为 1 则表示该位串所表征的指标已达到阈值.由于采用的是二进制表达方式,输入可以是模糊的指标数据,主要通过复杂免疫反应与动态演化来实现风险识别,对数据精度要求有所降低,数据的可获得性则提高了.本文所提出的模型与框架具有可拓展性,其中漏报率  $q$ 、基因分类数  $N_s$ 、位串长度  $l$ 、初始显性概率以及基因突变概率均可以根据现实需求进行动态设置.本文的平行计算模拟语言为 Java,工具为 JCreator,安装 Swarm2.2 工具包.

为表征各类事件的演化特点、发生概率、识别范围等特点以及计算实验的可对比性,将各类事件的初始模拟抗原数量设为 100,表示已经积累的突发事件数量;为了方便计算实验,抗体数量也设为 100.初始抗体是值全为 1 的位串,每周期产生 2 个抗原,表示应急管理时动态增加的事件.

##### (1) 非突发事件模拟

因为非突发事件发生转变的概率极小,该类事件容易认识,信息复杂度低,很少发生改变,故可假设抗原基因位串编码全为 0,表示事件没有指标达到阈值,即事件处于正常可控状态,变异概率设为 0.1.计算实验结果如图 2 所示.

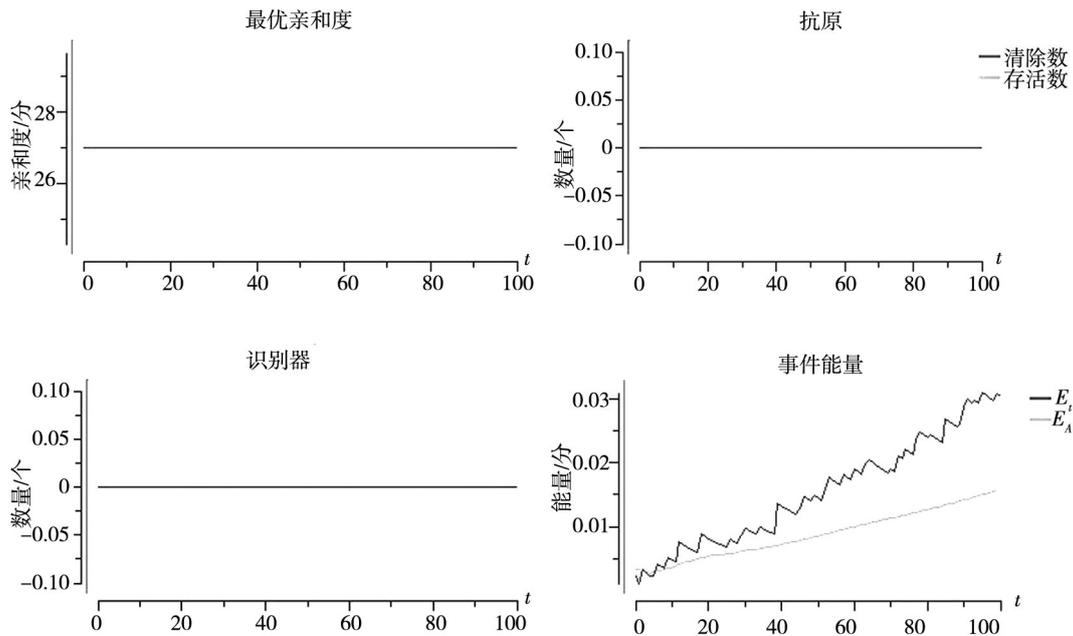


图 2 非突发事件免疫反应特性

Fig. 2 Immune response characteristics of non-emergency

由计算实验结果图 2 可知,亲和度一直维持在最高水平,非突发事件抗原在很短时间内就被清除,没有异常的跳跃情况,拟合度较高。免疫系统对风险识别器的数量要求为零。事件能量极小,趋近于 0。总体上看,非突发事件完全处于可控范围之内,认识度高,容易应对,短期可以被消减。

(2) 常规突发事件模拟

因为常规突发事件以一定的概率变化,事件容易认识,信息复杂度较低,较少发生改变。故可假设抗原基因位串编码为 1 的概率为 0.2,表示事件有少部分指标达到阈值,需要应急处理,变异概率设为 0.1。计算实验结果如图 3 所示。

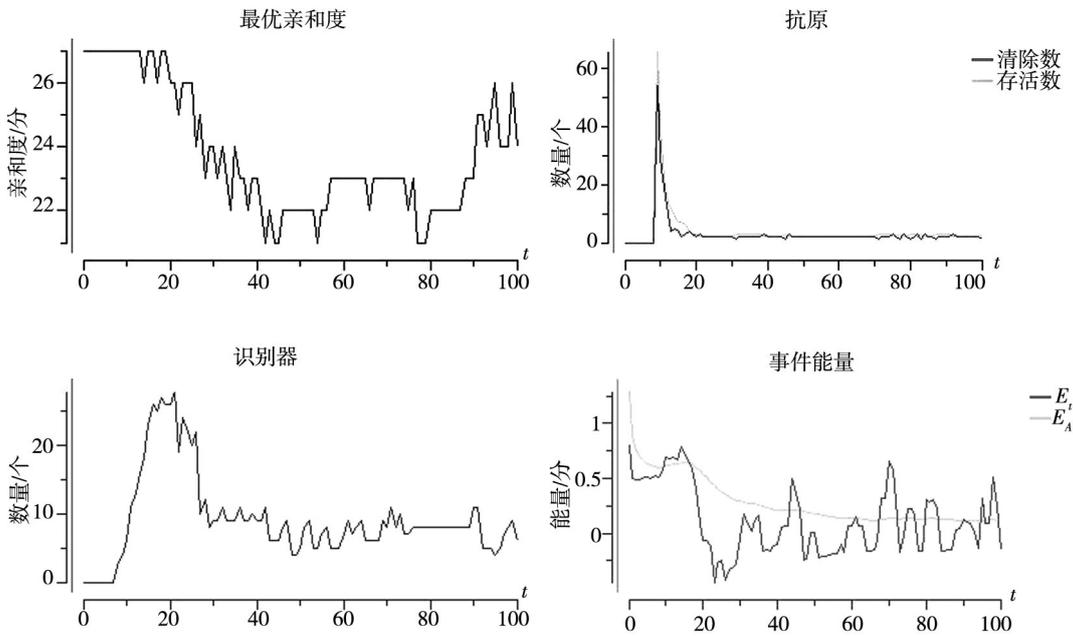


图 3 常规突发事件免疫反应特性

Fig. 3 Immune response characteristics of conventional emergency

计算实验结果图3显示,每周期的亲和度波动较大,但整体水平依然维持在较高水平. 抗原容易清除,后期可能存在小波动,但不影响总体趋势. 识别器数量存在波动,增长后随着抗原灭失,经历一段时间后,保存的数量较多,表明系统最终保留的有效抗体较多,对二次免疫的防御准备较好. 事件能量波动后,能量值较大,  $E_i$  在  $E_A$  周围波动.  $E_i$  存在小于零的情况,即当期信息熵  $I_k$  之和低于周期平均  $I_T$  之和,表明事件处于可控范

围,系统能量正在被消磨. 总体上分析,常规突发事件基本上可以控制,即使产生少量变化,但影响力不大.

(3) 亚非常规突发事件

因为亚非常规突发事件发生变化的概率较大,该类事件为小概率事件,会发生难以预知的改变. 故可假设抗原基因位串编码为1的概率为0.8,表示事件监测的大部分指标已经达到阈值,需要应急处理,变异概率为0.5. 计算实验结果如图4所示.

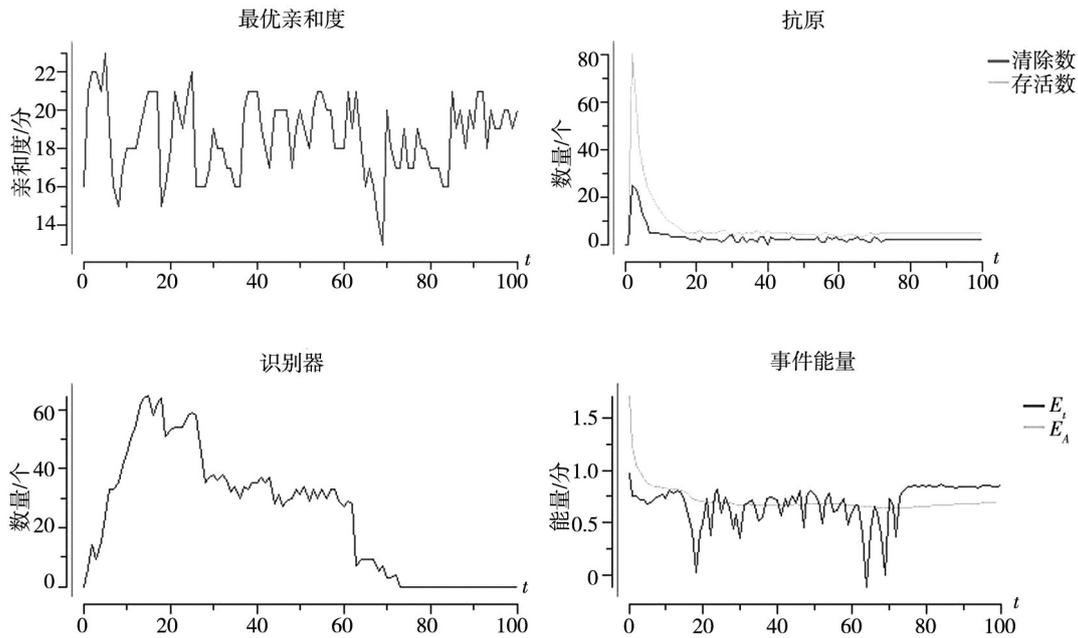


图4 亚非常规突发事件免疫反应特性

Fig. 4 Immune response characteristics of sub-unconventional crisis

计算实验结果图4表明,亲和度在一个较大的区间震荡,总体水平比常规突发事件的低. 抗原最初清除效果不佳,后期抗原仍有残留,难以完全清除. 识别器数量初期增长较快,总量高于常规突发事件,说明系统需要更多的识别器用于应对,经历一段时间后,随着抗原灭失,最终保存的数量较少. 由于亚非常规突发事件重复发生的可能性较小,所以系统最终保留的有效抗体较少,进行二次免疫防御的可能性较小. 事件能量部分周期波动幅度极大,  $E_A$  处于较高水平. 综合分析,亚非常规突发事件的应对没有经验可供借鉴,主要采用试错法,容易出现反复,后期危害难以全部清除,没有稳定的应对处置措施,需要不断提升监测与识别力度.

3.3 突发事件风险识别敏感性模拟

通过对风险识别器的初始抗原位串全为1的概率(初始显性概率)和基因突变概率进行双参数敏感性模拟分析(以0.1为模拟粒度),发现如下规律:

当初始显性概率小于0.1,且基因突变概率小于0.1时,事件抗原非常容易消除,系统能量小,波动幅度低,可以认为是非突发事件的概率组合.

当初始显性概率大于0.1,小于0.5,且基因突变概率距离0.5有0.1以上的差别时,事件抗原较易消除,系统能量存在波动,但波动间隙较长,亲和度较高,识别器数量适中,可以认为是

常规突发事件的概率组合。但依然存在免疫特性指标演化异常的地方,例如波动幅度较大,说明非常规突发事件可能隐藏于该类事件中,例如普通感冒与甲型流感,在病症上存在诸多相同点,但普通感冒容易通过强效药得到救治,甲型流感则反复无常。

当初始显性概率大于 0.5,且基因突变概率靠近 0.5 时,事件抗原的消除较缓慢,识别器数量波动大,峰值较高,亲和度普遍较低,系统能量的波动幅度较大与波动间隙较短,可以认为是亚常规突发事件的概率组合。存在免疫特性指标演化异常的地方较多,非常规突发事件隐藏于该类事件的可能性较大。

### 3.4 非常规突发事件的涌现

非常规突发事件在日常生活中很少发生,一旦发生,没有或者很少有相应的规则可以依循,且

影响面很大、容易发生次生灾害,带来长期不可控的负面影响。在非常规突发事件形成的过程中,这些致灾因子则隐藏于各类突发事件中,虽然可认为亚非常规突发事件介于常规突发事件与非常规突发事件之间,通过研究亚非常规事件来无限接近地认识非常规突发事件,但由诸多灾害链共同构成的非常规突发事件往往不能通过常规方法来研究,实际上当前突发事件应急管理研究成果较少针对非常规突发事件的本质特征进行量化界定<sup>[4]</sup>。采用识别亚非常规突发事件和各类事件组合关系以及它们的涌现来无限接近地认识非常规突发事件是一种新的研究思路。

通过以上模拟,将免疫学、应急管理、信息理论进行多学科融合,挖掘出各类事件在免疫系统运作机理下呈现的特点,综合归纳得到非常规突发事件的涌现如表 3 所示。

表 3 各类事件免疫反应特性比较

Table 3 Comparison among all emergencies on immune response characteristics

事件类别	亲和度	抗原清除效果	识别器	能量
非突发事件	较高且稳定	能迅速、持久、全部被清除	无	无
常规突发事件	较高,不稳定	能迅速被清除大部分,后期有少量波动	数量较多,快速上升,留存较多	较大,短期波动幅度小
亚非常规突发事件	较低,不稳定	能被清除一部分,后期有残留	数量多,快速上升,留存较少	大,部分短期波动幅度大
非常规突发事件的涌现	不稳定性更大	难以达到理想状态	数量要求更多,上升快,最终保留数量少	波动更快且数值更大

## 4 算例分析

根据国家自然科学基金重大研究计划“非常规突发事件应急管理研究”2012 年度检查交流会的研究成果统计,我国 2001 年至 2010 年特别重大的自然灾害中,重大森林火灾高居首位,严重破坏了人类社会的发展,对国民经济造成了重大损失。

本文以近年来世界各国重大森林火灾为例(主要包括 2009 年 2 月 7 日澳大利亚维多利亚州重大森林火灾、2009 年美国加州重大森林火灾等以及 2010 年的俄罗斯南部伏尔加格勒州和萨拉托

夫州爆发的重大山林大火),凝练森林火灾基因,通过情景应对和样本训练,构建初级识别器。然后,对 2013 年 1 月的澳大利亚的维多利亚州森林火灾进行仿真,以验证非常规突发事件风险识别模型的科学性和实用性。

关于森林火灾预测,有许多专家提出了监测的人为和自然两类指标。人为指标包括未熄灭的烟头、枪灰、未扑灭的火、交通工具产生的火星、油气管爆炸、钻探设备引火等等;自然指标包括雷电、空气中的含烃量、地势、气温、干燥物密度与分布等<sup>[30]</sup>。本文凝练出这些重大森林火灾基因指标如表 4 所示。

表4 重大森林火灾位串指标  
Table 4 Bit string index of major forest fires

层次	位串指标	取值为1的指标表征	取值为0的指标表征	取值
人为	民众行为	蓄意纵火	协同灭火	10
	领导能力	高官逃脱责任	领导团队协作	10
	救援资源	物资短缺	物资调配及时	1
	信息流通	瞒报漏报	信息发布及时	10
	经济状况	经济复苏减缓	经济复苏	1
	军事事件	战略军事活动暂停	军事活动继续	1
	联合	地理位置	靠近重要设施	无重要设施
跨区域性		火势蔓延至别国	火势在区域内	1 100
自然	气象条件	气温高	气温低	1
		风力大	风力小	10
		风向不稳	风向稳定	11
		空气含氧量高	空气含氧量低且有露水	1
		无降雨	降雨	10
	地理环境	火源附近短缺水源	附近有水源	1

通过底层简单指标值设置,自下而上涌现出高层次复杂性.表4中取值0与1表示指标表征所占的比例.联合指标指包含人为与自然双重影响.根据新华网新闻报导情况,将基因集合测算为{101011011,111001100,110111101},每层指标有50%达到表征(每层位串有50%以上为1),漏报概率根据实际情况报导与专家预测设为0.02,突变概率(事件发生重大转变的概率)设为0.3.

基于以往公认的2010年俄罗斯南部伏尔加格勒州森林火灾数据分析<sup>②</sup>以及2009年2月7日澳大利亚维多利亚州重大森林火灾的专家经验<sup>[31]</sup>,采用样本数据和专家经验模糊集成的训练方法,针对最近发生的2013年1月的澳大利亚的维多利亚州森林火灾进行仿真,通过现有的信息将基因集合测算为{010101001,110001100,110011010},每层指标有40%达到阈值,则初始抗原位串全为0的概率为0.6,漏报概率根据当前情况,设为0.01,突变概率为0.25,平行模拟长度设为100.具体模拟过程伪代码如下:

```

Procedure 火灾风险识别模拟
Begin

```

```

t = 0;

```

```

    初始化:随机产生100个位串60%为0的抗原,通过概率为0.25的变异与交叉,转变为具有特性的抗原;

```

```

    While t < 100 do

```

```

        Begin

```

```

            产生2个位串60%为0的抗原,并发生概率为0.25的突变(包括变异与交叉);

```

```

            产生100个位串全为1的初始抗体;

```

```

            抗体与抗原依次结合,计算亲和度,转轮得到最优亲和度;

```

```

            If(本期最优亲和度 < 上一周期最优亲和度) Then 该抗体被清除 Else 克隆选择该抗体并遗传(发生概率为0.25的突变)保留到下一周期,同时清除与该抗体结合的抗原;

```

```

            观测程序获取残留抗原数量、保存抗体数量、保存最优亲和度、计算能量E和EA;

```

```

            t = t + 1;

```

```

        End

```

```

    End

```

```

    通过模拟 模拟结果如图5所示.

```

② 火灾数据均从凤凰网的新闻报导中提取.俄罗斯发生森林火灾[EB/OL].<http://news.ifeng.com/world/special/eluosihuozai/>,2010.06.21/2010.09.04

图 5 的模拟结果表明,亲和度在中等水平上下波动,可见缺乏有效的应对措施. 抗原灭失较慢,但后期可以基本消除. 识别器的数量快速增长,后期保留的有效识别器数量较少,说明事件应对方案在二次免疫防御的作用较小,但事件的发展需要更为密切的监测. 事件能量演化不稳定,处于较高水平,存在快速跳跃的周期. 通过计算演化,可判定 2013 年澳大利亚森林火灾属于亚非常规突发事件. 模拟结果还显示出,该火灾需要较多的应对资源(识别器数量增长快)且应对效果有待进一步提升(亲和度维持在 10 ~ 25 之间,未达到最优值 27) 事件能量演化

图中  $E_i$  存在若干极小值,说明事件可能存在快速消减的措施,应及时建立相应应对策略.

实际上,澳大利亚历史上最严重的火灾发生于 2009 年 2 月 7 日维多利亚州,2 月 7 日也被称为“黑色星期六”,英国《Nature》杂志网络版也剖析了这次灾难性火灾的根源<sup>[31]</sup>. 从针对 2013 年 1 月维多利亚州火灾的新闻报导中不难看出,此次火灾相比 2009 年 2 月的特别重大森林火灾(危险等级极端高)仅能作为亚非常规突发事件,这一结论与本文的试验结果是一致的,也进一步验证了本文所提出模型的科学性和可行性.

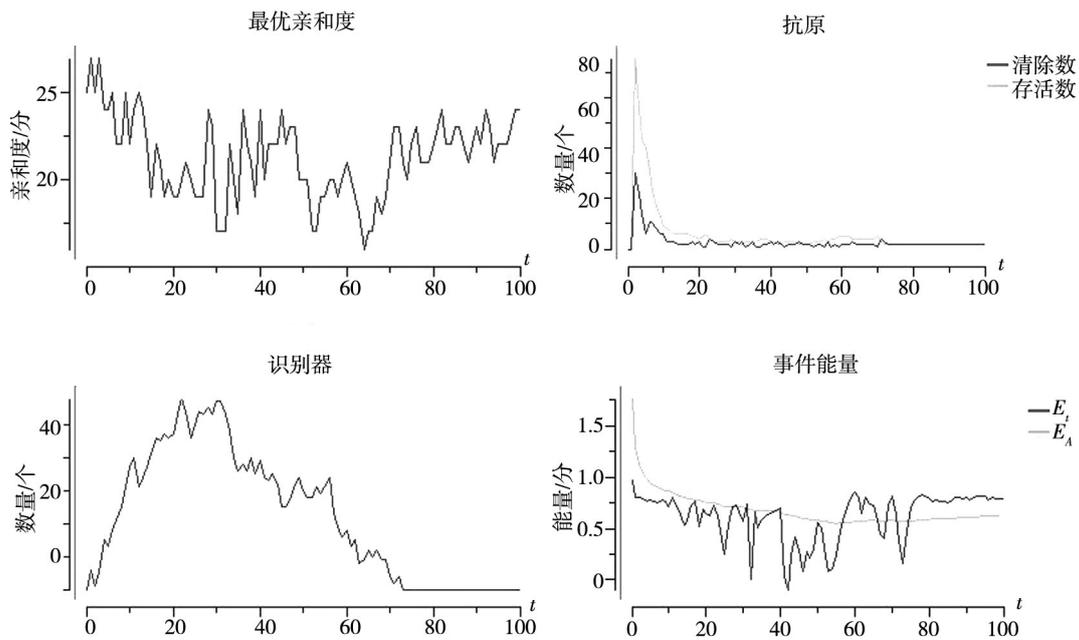


图 5 2013 年澳大利亚森林火灾免疫反应特性情况

Fig. 5 Immune response characteristics of forest fires in Australia in 2013

## 5 结束语

本文综合运用免疫学理论和计算实验技术,借鉴免疫系统信息识别机制,将(非常规突发)事件和风险识别器分别类比成抗原和抗体,依据免疫反应原理,构建风险识别模型,通过计算实验探索出非突发事件、常规突发事件、亚非常规突发事件的免疫反应特性,包括亲和度、抗原消除效果、识别器数量和能量演化,从而涌现出非常规突发事件的免疫反应具有亲和度不稳定性更大,抗原清除效果难以达到理想状态,识别器数量要求更

多、上升快、最终保留数量少,能量波动更快且数值更大等特点.

本文在对近年来几个主要重大森林火灾案例分析的基础上,对 2013 年 1 月的澳大利亚的维多利亚州森林火灾进行算例分析,将火灾的主要基因指标与平行免疫系统的参数进行关联,运用平行计算进行风险识别,进一步验证了风险识别模型的科学性和可行性.

非常规突发事件风险识别是一个复杂系统,采用多学科综合集成研究是解决复杂科学问题的发展趋势. 本研究通过多学科融合,为“情景应对”突发事件应急管理研究提供了新的思路与

方法。综合运用免疫学理论和计算实验技术研究非常规突发事件风险识别是一种新的尝试,(非常规突发)事件免疫基因指标的凝练、计算实验参数的选定和优化、风险识别标准体系和模型的完善等等都有非常广阔的深入研究的空间。

#### 参考文献:

- [1]国家自然科学基金委员会. 2011年度国家自然科学基金项目指南[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 109.  
National Natural Science Fund Committee. 2011 Annual National Natural Science Fund Project Guide [M]. Beijing: Science Press, 2010: 109. (in Chinese)
- [2]Howitt A M, Leonard H B. Managing Crises: Responses to Large-Scale Emergencies [M]. CQ Press, 2009.
- [3]范维澄. 国家突发公共事件应急管理科学问题的思考和建议[J]. 中国科学基金, 2007, 21(2): 71-76.  
Fan Weicheng. Advisement and suggestion to scientific problems of emergency management for public incidents [J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2007, 21(2): 71-76. (in Chinese)
- [4]钟永光, 毛中根, 翁文国, 等. 非常规突发事件应急管理研究进展[J]. 系统工程理论与实践, 2012, 32(5): 911-918.  
Zhong Yongguang, Mao Zhonggen, Weng Wenguo, et al. Progress of "study on unconventional emergencies management" [J]. Systems Engineering: Theory & Practice, 2012, 32(5): 911-918. (in Chinese)
- [5]Christopher B Mayhorn, Anne Collins McLaughlin. Warning the world of extreme events: A global perspective on risk communication for natural and technological disaster [J]. Safety Science, 2012, 4(14): 1-8.
- [6]张辉, 刘奕. 基于“情景应对”的国家应急平台体系基础科学问题与集成平台[J]. 系统工程理论与实践, 2012, 32(5): 947-953.  
Zhang Hui, Liu Yi. Key problems on fundamental science and technology integration in "scenario-response" based national emergency response platform system [J]. Systems Engineering: Theory & Practice, 2012, 32(5): 947-953. (in Chinese)
- [7]Liao Z, Wang B, Xia X, et al. Environmental emergency decision support system based on Artificial Neural Network [J]. Safety Science, 2012, 50(1): 150-163.
- [8]尤薇佳, 李红, 刘鲁. 突发事件 Web 信息传播渠道信任比较研究[J]. 管理科学学报, 2014, 17(2): 19-33.  
You Weijia, Li Hong, Liu Lu. Comparison of Web channels for unconventional emergency events information dissemination [J]. Journal of Management Sciences in China, 2014, 17(2): 19-33. (in Chinese)
- [9]杨青, 杨帆. 基于元胞自动机的突发传染病事件演化模型[J]. 系统工程学报, 2012, 27(6): 727-738.  
Yang Qing, Yang Fan. Emergency epidemics spread model using cellular automata [J]. Journal of Systems Engineering, 2012, 27(6): 727-738. (in Chinese)
- [10]李双琳, 马祖军. 震后交通管制下多出救点应急物资调运问题[J]. 管理科学学报, 2014, 17(5): 1-13.  
Li Shuanglin, Ma Zujun. Post-earthquake multi-depot relief distribution under traffic control [J]. Journal of Management Sciences in China, 2014, 17(5): 1-13. (in Chinese)
- [11]魏一鸣, 张林鹏, 范英. 基于 Swarm 的洪水灾害演化模拟研究[J]. 管理科学学报, 2002, 5(6): 39-46.  
Wei Yiming, Zhang Linpeng, Fan Ying. Swarm based study on complexity in flood disaster [J]. Journal of Management Sciences in China, 2002, 5(6): 39-46. (in Chinese)
- [12]苏海军, 欧阳红兵. 危机传染效应的识别与度量——基于改进 MIS-DCC 的分析[J]. 管理科学学报, 2013, 16(8): 20-30.  
Su Haijun, Ouyang Hongbing. Identification and measurement of contagion effects of the crises: Based on improved Markov independent switching dynamic conditional correlation model analysis [J]. Journal of Management Sciences in China, 2013, 16(8): 20-30. (in Chinese)
- [13]Matzinger P. The danger model: A renewed sense of self [J]. Science, 2002, 296(12): 301-305.
- [14]YANG Qing, MA Huimin, YU Yanling. Multi-agent risk identifier model of emergency management system engineering based on immunology [J]. Systems Engineering Procedia, 2012, (4): 385-392.
- [15]盛昭瀚, 张维. 管理科学研究中的计算实验方法[J]. 管理科学学报, 2011, 14(5): 1-10.  
Sheng Zhaohan, Zhang Wei. Computational experiments in management science and research [J]. Journal of Management Sciences in China, 2011, 14(5): 1-10. (in Chinese)
- [16]宋华岭, 温国锋, 刘丽娟. 复杂信息度量的安全系统结构复杂性评价[J]. 管理科学学报, 2012, 15(2): 83-96.  
Song Hualing, Wen Guofeng, Liu Lijuan. Structure complexity assessment for safety system based on complex information metric [J]. Journal of Management Sciences in China, 2012, 15(2): 83-96. (in Chinese)
- [17]Haldane A G, May R M. Systemic risk in banking ecosystems [J]. Nature, 2011, 469(7330): 351-355.
- [18]韩智勇, 翁文国, 张维, 等. 重大研究计划“非常规突发事件应急管理研究”的科学背景、目标与组织管理 [J].

- 中国科学基金, 2009, (4): 215–220.
- Han Zhiyong, Weng Wenguo, Zhang Wei, et al. Backgrounds, targets, and organization of the major research plan “Study on unconventional emergencies management” [J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2009, (4): 215–220. (in Chinese)
- [19] Kim J, Bentley P J, Aickelin U. Immune system approaches to intrusion detection: A review [J]. Natural Computing, 2007, 6(4): 413–466.
- [20] Forrest S, Beauchemin C. Computer Immunology [J]. Immunological Reviews, 2007, 216: 76–197.
- [21] 莫宏伟, 左兴权. 人工免疫系统 [M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- Mo Hongwei, Zuo Xingquan. Artificial Immune System [M]. Beijing: Science Press, 2009. (in Chinese)
- [22] Yang Qing, Shi Yaneng, Wang Zhan. Multi-Agent Research on Immunology-based Emergency Preplan. Proceedings of 2010 International Conference on e-Education, e-Business, e-Management and e-Learning (IC4E 2010) [C]. Published by the IEEE Computer Society, 2010: 407–410.
- [23] 刘星星, 杨青. 基于免疫学的非常规突发事件基因研究 [J]. 工业工程, 2013, 16(2): 134–140.
- Liu Xingxing, Yang Qing. A research on abnormal emergency gene based on immunology [J]. Industrial Engineering Journal, 2013, 16(2): 134–140. (in Chinese)
- [24] 刘霞, 严晓, 刘世宏. 非常规突发事件的性质和特征探析 [J]. 北京航空航天大学学报(社会科学版), 2011, 24(3): 13–18.
- Liu Xia, Yan Xiao, Liu Shihong. Analysis on the property and characteristics of non-conventional emergency events [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics (Social Sciences Edition), 2011, 24(3): 13–18. (in Chinese)
- [25] 王飞跃, 邱晓刚, 曾大军, 等. 基于平行系统的非常规突发事件计算实验平台研究 [J]. 复杂系统与复杂性科学, 2010, 7(4): 1–10.
- Wang Feiyue, Qiu Xiaogang, Zeng Dajun, et al. A computational experimental platform for emergency response based on parallel systems [J]. Complex Systems and Complexity Science, 2010, 7(4): 1–10. (in Chinese)
- [26] Johnson S. Emergence: The Connected Lives of Ants, Brains, Cities, and Software [M]. Simon and Schuster, 2012.
- [27] Aickelin U, Dasgupta D, Gu F. Artificial Immune Systems [M]. Springer US: Search Methodologies, 2014: 187–211.
- [28] YANG Qing, YANG Fan. Multi-agent computational experiment on twice-linked model of unconventional emergencies evolution mechanism [J]. Journal of Computers, 2013, 8(4): 1035–1042.
- [29] Li Tao. An immunity based network security risk estimation [J]. Science in China Ser F: Information Sciences, 2005, 48(5): 557–578.
- [30] Grishin A M, Filkov A I. A deterministic-probabilistic system for predicting forest fire hazard [J]. Fire Safety Journal, 2011, 46(1–2): 56–62.
- [31] Schiermeier Q. Australian bushfires rage [J]. Nature News, 2009, 2(9): 89.

## Risk identification model of unconventional crisis based on immune system

YANG Qing, LIU Xing-xing, CHEN Rui-qing, CAI Wen-tao

Management School of Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China

**Abstract:** The risk identification of unconventional crisis is one of the core scientific problems of the emergency management. Due to the current situation of frequently facing a baseless simulation in academic study and practical application, risk identification has become a difficult issue that needs to be addressed as a matter of urgency. By integrating immunology theory, complex adaptive system theory and the computational experiment, this paper proposes a theory for the evolution from the antibody of risk recognizer into the antigen of unconventional crisis, and builds a standard system and a model for identification of the affinity of risk identification, the cleanup effect of antigen, the amount and energy of the risk recognizers and so on. It adopts a research idea of identifying sub-unconventional crisis and the syntagmatic relation among various events and its emergency to understand the unconventional crisis infinitely. By computational experiments and illustrative examples, the feasibility is verified.

**Key words:** unconventional crisis; risk identification; immune system; computational experiment; emergence