

文章编号:0253-9993(2012)06-1005-05

基于 multi-agent 的煤矿水害演化模型

龚承柱,李兰兰,柯晓玲,诸克军

(中国地质大学(武汉)经济管理学院,湖北 武汉 430074)

摘 要:根据矿区的水文地质条件,分析了煤矿水害事故的形成原因和演化机制,采用复杂系统理论和多主体建模方法,建立了煤矿水害演化模型;利用 NetLogo 仿真平台,对不同类型水害事故进行仿真模拟,动态表现煤矿水害演化过程以及影响因素之间的脆弱性关系。研究表明:煤矿水害是一种受控于多种因素、具有非线性动力特征的复杂自适应现象,只有了解矿区水文地质条件,并将复杂系统理论和多主体建模方法引入水害防治研究中,才能从本质上描述水害演化机制。

关键词:煤矿水害;演化模型;复杂系统;多主体建模和仿真;NetLogo

中图分类号:TD745 **文献标志码:**A

Evolutionary model of coal mine water hazards based on multi-agent simulation

GONG Cheng-zhu, LI Lan-lan, KE Xiao-ling, ZHU Ke-jun

(School of Economics and Management, China University of Geosciences(Wuhan), Wuhan 430074, China)

Abstract: Based on coal mine hydrogeological conditions, the causes and evolution mechanism of coal mine water hazards were presented. By using complex systems theory and multi-agent modeling method, an evolutionary model of coal mine water hazards was developed. Then simulated the evolution process with different system conditions by Netlogo platform, and the coal mine water hazards process and vulnerability relationship were demonstration dynamical. The research shows that, the coal mine water hazards, influenced by multiple factors, is a complex and adaptive phenomenon that possesses nonlinear dynamic characteristics. Only by understanding the mine hydrogeological conditions, use complex systems theory and multi-agent modeling method, the mechanism of coal mine water hazards can be uncovered in nature.

Key words: coal mine water hazards; evolution model; complex system; agent-based modeling and simulation (ABMS); Netlogo

我国矿井多数都属于水文地质条件复杂类型^[1]。当前,随着煤矿开采深度的延伸,矿井水文地质条件更加复杂,突水事故也呈现频率上升、危害增大的趋势。据不完全统计,自 2000 年以来,全国煤矿发生重特大突水事故 473 起,死亡及失踪人数达到 2 635 人^[2]。

煤矿水害受控于多种因素影响,与矿区水文地质条件和采矿活动密切相关^[3]。有关煤矿水害评价方法较多,如突水系数法^[4]、基于 GIS,ANN 和 AHP 等的脆弱性指数法^[5]、关键层分析法^[6]、事故树分析

法^[7]、信息融合分析法^[8]、直流电法^[9]、瞬变电磁法^[10]等。其中,突水系数法由于物理概念简单,计算方便且易于操作,运用最为广泛。但是,该方法仅考虑水压和隔水层厚度两个因素,未能描述这种受控于多因素且具有非常复杂机理的非线性动力现象,已不能适应新的采矿方法和新的地质环境条件下水害评价。而其他方法,分别从水害主控因素和物理探测角度进行了分析评价并取得了一定成效,但是尚未从系统角度分析水害形成与演变过程。因此,本文从复杂系统研究入手,采用基于主体的建模和仿真(Agent-

based modeling and simulation, ABMS) 方法^[11-13], 对煤矿水害进行模拟仿真研究。

1 ABMS 理论与方法

基于主体的建模和仿真是当前国内外对复杂系统进行模拟和研究的重要方法。美国圣塔菲研究所 (SFI) 专家认为复杂系统其本质是具有涌现性^[14]; 系统整体才具有而孤立的组成部分及其总和不具备, 并且由系统组成部分按照它们的关联性相互作用、相互补充、相互制约而激发出来的。组成复杂系统的具有一定自治性、交互能力、反应能力的基本单元称为 Agent。复杂系统通常由多种类型的 Agent 构成, Agent 以及 Agent 与环境之间的相互作用形成了系统的复杂性。ABMS 作为一种复杂系统模拟和仿真方法, 侧重于从微观主体出发, 采用自下而上的模式, 通过对不同类型 Agent 的判断、学习、控制、反应等个性机制的设计, 使系统中所有 Agent 相互作用, 从而表现出系统的宏观复杂性。相比各种传统的从整体上把握系统宏观特性的方法, 这种自下而上的建模方式能更直观、更现实地表达系统的复杂性, 因而被广泛用于多种复杂系统的仿真模拟。

ABMS 的意义在于简化和抽象现实世界具体事物或现象的细节, 在一定的时空范围预测现实事物或现象的演变过程, 以满足实际运用或科学研究的需要。按照内部结构的差异, 通常把 Agent 分为慎思型、反应型和混合型^[15]。慎思型 Agent 具有复杂的逻辑推理能力和学习能力, 强调 Agent 的智能性, 但与环境和其他智能体交互的反应速度较慢; 反应型 Agent 不使用复杂的符号推理, 弱化 Agent 自身的智能性, 使用“感知-动作”模型, 强化自身与环境和其他 Agent 的协同性, 因而有较快的交互反应速度; 混合型 Agent 则通过高层包含认识推理机制、低层强调快速反应的两层设计实现两者优点的结合。

ABMS 建模一般步骤为: ① 根据系统特点, 抽象出不同类型的 Agent, 并定义出 Agent 属性, 用于描述系统的当前状态; ② 确定复杂系统中每个 Agent 运行规则, 这种规则可以结合已有研究成果, 在很多领域中, 由于系统复杂, 难以定量表述之间精确关系, 规则的确定往往需要依靠专家系统; ③ 运行模型, 得到系统的后续状态的仿真模拟, 然后与现实状态比较, 并将对比信息反馈到第 2 步, 不断改变参数, 以期得到更准确的仿真模拟。

2 基于 ABMS 的煤矿水害演化模型

煤矿水害的形成和发生是一种复杂自适应现象,

其演化过程可以看作不同水文地质条件和采矿活动下矿井不同区域水量的变化, 其实质则是煤矿地下水系统中各种影响因素的状态变化。因此, 通过分析煤矿水害形成原理, 可以建立基于 ABMS 的煤矿水害演化模型。

2.1 水害形成原理

依据煤矿突水原理和能量意外释放与人为失误理论, 得出煤矿突水事故的发生是由于不合理生产过程使地表或地下水系统能量向井巷工程的意外释放造成的。不合理生产活动是能量意外释放的诱因, 不合理排水系统和不恰当的安全救助措施加重了水害事故的灾害性, 水害事故概念模型如图 1 所示。

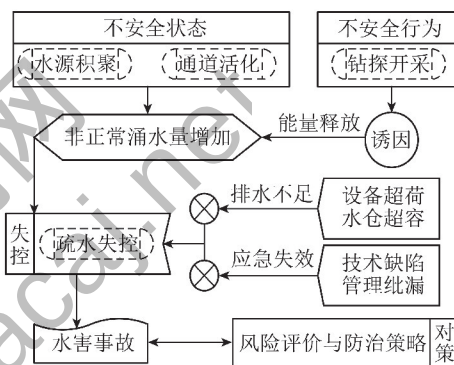


图 1 煤矿水害的形成原因

Fig. 1 Causes of coal mining water hazards

根据图 1, 煤矿水害事故危险源可分为 4 类: ① 水源。常见的有地表水、孔隙水、裂隙水、老窑水和岩溶水等, 以水压、涌水量表明危险物能量大小; ② 通道。通道与隔水层密切相关, 往往影响隔水层拦截效果。天然通道有断层、裂隙、陷落柱等, 人为通道包括采矿扰动、不良钻孔等, 是水源进入采区的途径; 水源和通道构成矿井水能量意外释放的物质条件, 使矿井处于“不安全状态”; ③ 采矿活动。主要是生产中技术、管理、操作漏洞和人为失误等“不安全行为”, 它们是导致水源能量增高、通道活化、非正常涌水量增加的水害“诱发”因素; ④ 排水与应急措施。常见的有排水设备停止运转、排水能力不足、水害防治技术缺陷和管理纰漏等, 它们将非正常涌水恶化成了造成生命和财产损失的水害事故。上述四大危险源是煤矿水害发生的必要条件, 其中任何一个出现问题, 即能导致水害发生。

2.2 水害演化机制

造成煤矿水害的主控因素具有明显的非线性和不确定, 是一种典型的复杂系统, 具有显著的整体涌现性。为了模拟水害形成过程, 必须能够表现系统中作用要素之间的作用机制, 而且需要根据环境变化表现系统分化、涌现等演化过程, 因此本文根据矿区水

文地质特征,结合水害事故概念模型,提出矿区水害演化机制,如图2所示。

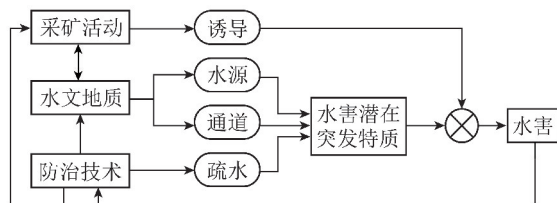


图2 矿区水害演化机制

Fig. 2 Evolution mechanism of coal mining water hazards

根据图2可知,煤矿水害发生的根本原因在于矿区水文地质条件复杂、采矿活动带来地质构造破坏和水害防治技术不到位。其中通过水文地质探测可以确定水源和通道存在,由于地下环境复杂难以精确测量,须结合采区的水压、涌水量、渗透率、富水性等探测数据进行判断。采矿活动包括钻探、掘进等容易引起地质构造破坏的系列生产活动,是水害直接诱导因素。水害防治技术考虑诸多因素,与相关理论和技术发展密切相关,这里主要考虑了采区的排水能力,包括中央水仓的容量和泵房排水能力。总体来说,矿区水文地质条件影响采矿活动,采矿活动诱发水害发生,水害发生会促进防治技术提升,防水技术进步又改变采矿方式和矿区水文地质条件,他们之间虽然关系复杂,但相互作用机制明确。

2.3 基于 ABMS 的水害演化模型

根据煤矿水害演化机制和 ABMS 理论,采用自下而上的建模方式,从微观主体出发,抽象出4种 Agent,分别为:水源 Agent、通道 Agent、疏水 Agent 和采矿活动 Agent。其中,每种 Agent 是1个种群,包含很多个体,每个个体具有自身属性和作用规则。同时,这4种 Agent 均为混合型 Agent,不仅具备较快的反应速度,也强调与环境交互作用和个体之间协调作用,通过 Agent 的微观行为影响系统整体性变化。煤矿水害演化系统的 ABMS 模型如图3所示。

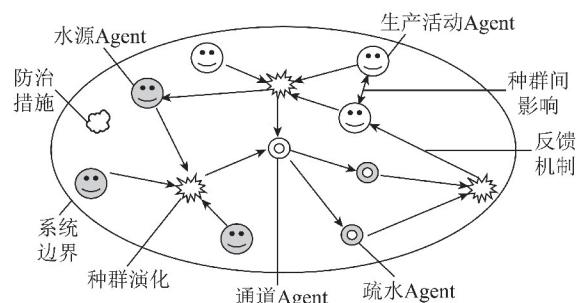


图3 煤矿水害演化 ABMS 模型

Fig. 3 ABMS model of coal mining water hazards

图3中,不同类型的 Agent 用不同形状或不同颜色表示。例如,图中有3个水源 Agent,他们相互作用之后,形成种群演化,就是水源积聚,而且这3个水源 Agent 可以根据其自身属性代表不同类型的水源。煤矿水害演化 ABMS 模型中,每种 Agent 的运行规则相对简单,系统运行规则为:水源 Agent 不断积聚、根据通道 Agent(隔水层)的渗透性,不断涌向采煤工作面,采煤工作面中采矿活动 Agent 不断移动,改变水源 Agent 的数目和通道 Agent 的渗透性,同时疏水 Agent 促使采煤工作面的积水不断流向中央水仓,中央水仓把积水排除井外,如果中央水仓被淹,采煤工作面的积水剧增,将导致水害发生。通过不断改变每种 Agent 的数量、状态和运行规则,让其与现实煤矿中的各种条件类似,表现出不同煤矿的特点,从而动态的预测煤矿水害发生风险和防治效果。

3 仿真模拟和结果分析

目前,支持 ABMS 的仿真软件有很多:Netlogo, Anylogic, Repast, Swarm 等。由于 Netlogo 具有编码容易、操作简单和可控性强等特点,本文采用 Netlogo 作为仿真平台^[16],根据煤矿水害演化 ABMS 模型,进行仿真模拟。根据模型特点,把二维平面分为水源区、通道区、采矿活动区和排水区。图4为模型在 Netlogo 平台运行界面。

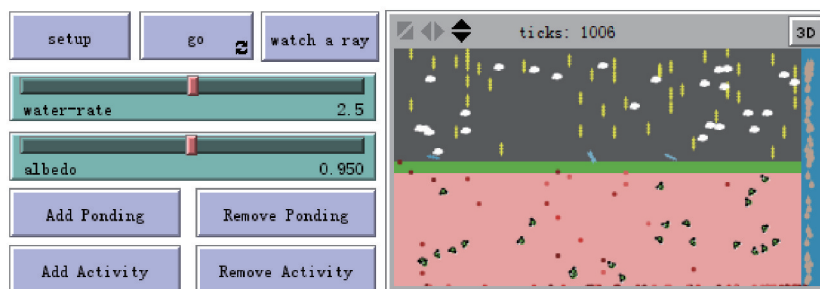


图4 NetLogo 平台的模型界面

Fig. 4 The model operation interface in NetLogo simulation platform

3.1 参数设置

为了进行仿真实验,对相关参数进行设置。水源

Agent 参数:等级为 $[0, 5.0]$,水量个数为 $[0, 1\ 000]$ 。等级表示水源 Agent 进入水源区速度,矿区富水性越

强,对应的等级越大,水源 Agent 进入水源区速度越快,隔水层上方的来水量数目越多。仿真时,根据矿区富水性强弱进行判断,设定为 5 个等级,来水量数目不超过 1 000。通道 Agent 参数:[0.9,1.0],取值大小表示隔水层效果,可以根据专家确定与矿区是否存在断层、裂隙、陷落柱密切相关,不存在表示隔水层效果越好,对应取值越大。有时矿区采用钻探疏水,是一种有意行为,此时渗透性取 0.9。采矿活动 Agent 参数:25N,N 表示班次数目,表示采矿活动强度按照班次倍数增加,可以根据实际情况进行修改,其数量多少将影响水源隔水层性能。疏水 Agent 最大排水能力设定为 200,提高排水能力后,最大排水能力设定为 500,仿真步长为 5 000 次。

参数取值范围确定之后,按照不同条件矿井,产生不同等级产生水源 Agent,从水源区注入,并在水源区向下流动,积聚在隔水层上方,同时水源 Agent 根据通道 Agent 的取值,按照一定概率向下渗透,并进入采矿活动区。如果存在采矿活动 Agent,则采矿活动 Agent 在采矿活动区移动,其数量多少将影响水源 Agent 的数量和通道 Agent 的取值。疏水 Agent 把采矿活动区的积水通过排水区排出井外,当排水区超过最大排水能力时,排水系统失效。采矿活动区因积水无法排放,导致积水增多,采矿活动区的积水越多,发生水害风险越高,水害危害越大。

3.2 仿真结果

主要介绍 6 种类型的仿真实验,分别用来描述水文地质条件和不同影响因素下煤矿水害的演化过程,以及水害防治技术的应用效果。由于仿真过程界面过大,不便附图,本文只给出了 6 种类型仿真结果,如图 5 所示。

在图 5 中,来水量表示水源区水量变化曲线,表示矿区富水性;积水量是隔水层拦截的水量变化曲线,表示隔水层的拦截效果;涌水量是采区巷道水量变化曲线,表示采区发生水害的风险程度;排水量是中央水仓排水量变化曲线,表示采区的排水能力。图 5(a)为模拟安全开采状态下的各区域水量变化,仿真结果中采区积水量和排水区排水量波动一致,隔水层拦截水量一直处于较低水平。与现实对比,这是一种理想状态,说明了安全生产与隔水层拦截的水量密切相关,因此减少隔水层拦截的水量是降低水害风险的有效措施。图 5(b)为模拟隔水层良好状态下各区域水量变化,仿真结果发现隔水层拦截的水量与水源区积水量波动一致,说明隔水层效果与拦截的水量显著相关,因此在富水性较强矿区,可以通过增加隔水层厚度降低水害发生风险。图 5(c)为模拟隔水层瞬

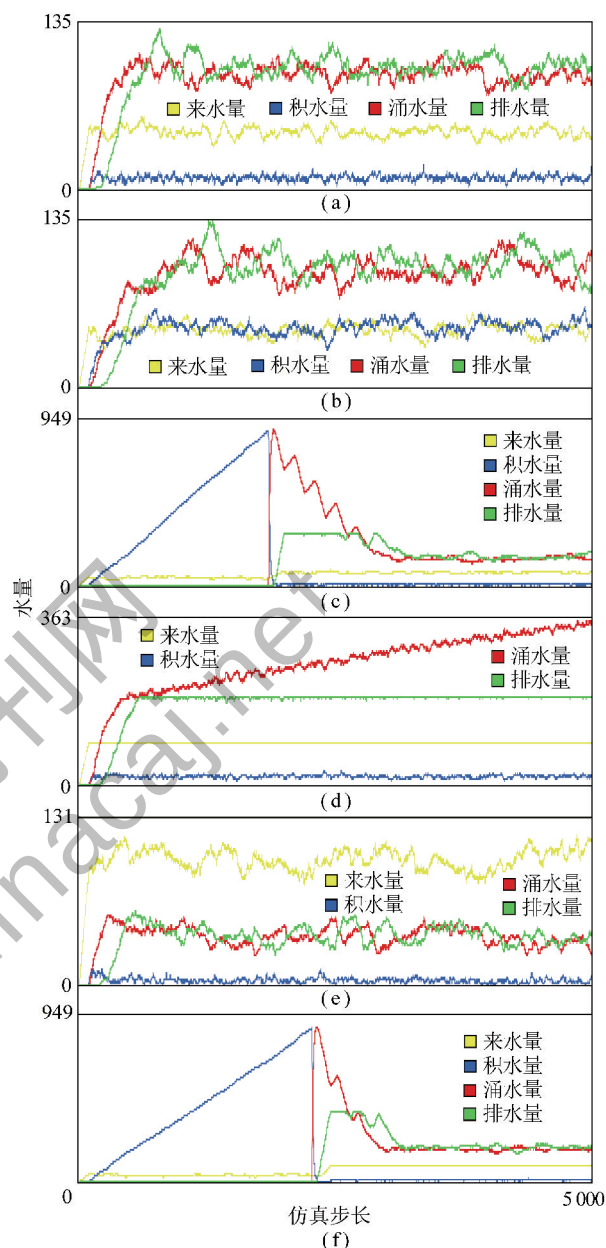


图 5 仿真结果

Fig. 5 Simulation results

间破坏状态下水害事故演化过程,模拟时首先让隔水层拦截水量达到极限(接近 1 000),然后瞬间降低隔水层通透性。仿真结果发现,当隔水层破坏瞬间,采区积水量剧增,同时排水区达到最大排水能力,直到采区积水量小于最大排水能力,才恢复平衡。这种情况类似于高压采区底板突水、老窑区穿透突水等事故,爆发后具有极大威胁。这种状态下,做好探测工作尤为重要,如果不能提前预测,往往造成重大水害事故。图 5(d)为模拟排水能力不足状态下各区域水量变化,仿真结果发现,排水量逐步达到最大排水能力后,采区积水量逐步增加,将有发生水害的风险。现实中也存在这种情况,例如矿区遇到长时间降雨等气象条件,导致江河湖泊水位上涨,促使大量地表水

进入采区,如果排水能力不足,将会发生水害事故。这种情况下,排水能力是瓶颈,应提供应急措施,增加排水设备,保证积水正常排出。图5(e)为模拟采用堵水策略之后的各区域水量变化,仿真结果发现实施堵水措施之后,只有水源区积水相对较多,采区积水量相对较少,说明堵水措施能够降低进入采区的水量。现实中,可用的堵水策略如帷幕注浆、底板加固等。图5(f)为模拟提高排水能力之后各区域水量变化,仿真时模拟了水害事故下提高输水能力的效果,与图5(c)结果对比发现,提高排水能力可以减少采区淹没时间。在实际水害事故中,加快排水也是挽回损失的重要方式,因此,煤炭企业需备用一定量应急排水设备,以备急时之需。

4 结 语

采用 ABMS 理论研究煤矿水害演化过程具有以下优势:① 动态表现不同条件下矿区水害演化过程,可以模拟煤矿水害影响因素之间的脆弱性和相互制约关系;② 能够表现出复杂自适应系统的涌现性,得到一些煤矿水害的演化规律,为煤矿水害风险评价提供了新的研究平台;③ 具备较好拓展性,能够吸收煤矿水害研究的最新理论。

本文基于 ABMS 理论煤矿水害演化模型处于刚刚起步阶段,目前可以定性表现出水害演化过程和水害防治策略效果。在以后深入研究过程中,可以结合复杂系统和人工智能领域相关方法进行定量分析,更加准确的表现水害演化过程和预警工作,以减少水害发生的风险,为煤炭企业安全生产提供服务。

参考文献:

- [1] 中国煤炭工业劳动保护科学技术学会. 矿井水害防治技术[M]. 北京:煤炭工业出版社,2007.
- [2] 缪协兴,浦海,白海波. 隔水关键层原理及其在保水采煤中的应用研究[J]. 中国矿业大学学报,2008,37(1):1-4.
Miao Xiexing, Pu Hai, Bai Haibo. Principle of water-resisting key strata and its application to water-preserved mining[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2008, 37(1):1-4.
- [3] 武强,张志龙,马积福. 煤层底板突水评价的新型实用方法[J]. 煤炭学报,2007,32(1):42-46.
Wu Qiang, Zhang Zhilong, Ma Jifu. A new practical methodology of coal floor water bursting evaluating[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(1):42-46.
- [4] 段水云. 煤层底板突水系数计算公式的探讨[J]. 水文地质工程地质,2003(1):96-99.
Duan Shuiyun. Probe into the calculation formula of coefficient of water bursting from coal seam floor[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2003(1):96-99.
- [5] 武强,张志龙,张胜元,等. 煤层底板突水评价的新型实用方法——脆弱性指数法[J]. 煤炭学报,2007,32(11):1121-1126.
Wu Qiang, Zhang Zhilong, Zhang Shengyuan, et al. A new practical methodology of coal floor water bursting evaluating-the vulnerable index method[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(11):1121-1126.
- [6] 孔海陵,陈占清,卜万奎,等. 承载关键层、隔水关键层和渗流关键层关系初探[J]. 煤炭学报,2008,33(5):485-488.
Kong Hailing, Chen Zhanqing, Bu Wankui, et al. A primary exploration on the relationships among loading key strata, water-resisting key strata and seepage key strata[J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(5):485-488.
- [7] 王长申,孙亚军,杭远. 基于事故树分析的煤矿潜在突水危险评价研究[J]. 岩石力学与工程学报,2009,28(2):298-304.
Wang Changshen, Sun Yajun, Hang Yuan. Application of fault tree analysis to risk assessment of potential water-inrush hazards in coal mining[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(2):298-304.
- [8] 李丽,程久龙. 基于信息融合的矿井底板突水预测[J]. 煤炭学报,2006,31(5):623-626.
Li Li, Cheng Jiulong. Floor water irruption prediction based on information fusion[J]. Journal of China Coal Society, 2006, 31(5):623-626.
- [9] 于景邨. 煤矿深部开采中的地球物理技术现状及展望[J]. 地球物理学进展,2007,22(2):586-592.
Yu Jingcun. Development and prospect of geophysical technology in deep mining[J]. Process in Geophysics, 2007, 22(2):586-592.
- [10] 刘志新,于景邨,郭栋. 矿井瞬变电磁法在水文钻孔探测中的应用[J]. 物探与化探,2006,30(1):59-61.
Liu Zhixin, Yu Jingcun, Guo Dong. The application of the mining transient electromagnetic method to the exploration of hydrological borehole[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2006, 30(1):59-61.
- [11] Zhang T, Zhang D. Agent-based simulation of consumer purchase decision-making and the decoy effect[J]. Journal of Business Research, 2007, 60:912-922.
- [12] Schramm M E, Trainor K J, Shankre M, et al. An agent-based diffusion model with consumer and brand agents[J]. Decision Support Systems, 2010, 50(1):234-242.
- [13] Kim S, Lee K, Cho J K, et al. Agent-based diffusion model for an automobile market with fuzzy TOPSIS-based product adoption process[J]. Expert Systems with Applications, 2011, 38(6):7270-7276.
- [14] 约翰·霍兰. 隐秩序:适应性造就复杂性[M]. 周晓牧,韩晖,译. 上海:上海科技教育出版社,2000.
- [15] 李成,刘静,钟伟才. 协同进化计算与多智能体系统[M]. 北京:科学出版社,2006.
- [16] Wilensky U. Center for connected learning and computer-based modeling[M]. Evanston, IL:Northwestern University, 1999.