

# 基于 Swarm 的洪水灾害演化模拟研究

魏一鸣, 张林鹏, 范英

(中国科学院科技政策与管理科学研究所, 北京 100080)

**摘要:**在复杂适应系统中, 整个系统的复杂行为是从底层自下而上“涌现”的, 这种由每个主体的适应性形成整个系统的复杂性的情形可以通过计算机模拟的方式显示出来. 复杂系统模拟工具 Swarm 就是利用这种自下而上的建模思想, 对复杂系统进行计算机模拟的软件工具包. 文章建立了基于 Swarm 的洪水灾害的时空演化模拟平台, 开展了洪水灾害时空演化的模拟实例研究, 得到了一些关于洪水灾害的时空演化规律, 对减灾管理具有指导意义.

**关键词:**复杂自适应系统; 系统模拟; Swarm; 灾害管理

**中图分类号:** P426. 616

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1007 - 9807(2002)06 - 0039 - 08

## 0 引言

洪水灾害是人与自然关系的一种表现. 一般而言, 形成洪水灾害必须同时存在诱发洪水的因素(致灾因子)及形成洪水灾害的环境(孕灾环境), 并在洪水影响区内存在人类聚居地或财产(承灾体). 它们三者之间相互作用的结果形成了通常所说的灾情. 孕灾环境、致灾因子、承灾体、灾情之间相互影响和相互联系, 形成了一个具有一定结构、功能、特征的复杂体系. 从系统论的观点来看, 这就是一个系统, 称之为洪水灾害系统<sup>[1, 2]</sup>.

洪水灾害系统具有不均匀性、差异性、多样性、突发性、随机性与可预测性、规律性等复杂性的特点. 洪水灾害的不均匀性和差异性不仅表现在时间分布上, 而且在空间分布方面也具有不均匀性和显著的差异性. Rundle 采用分形理论对洪水灾害系统中存在的自相似性特征进行了验证<sup>[3]</sup>; 王顺义、罗祖德等运用混沌理论针对洪水灾害如何跨过有序到无序的分界面的复杂行为进行了解释<sup>[4]</sup>; 傅军、丁晶等开展了洪水混沌特性的初步研究<sup>[5]</sup>; 魏一鸣等开展了基于神经网络的洪水灾害预测方法的研究<sup>[6]</sup>, 应用相空间重构技术开展了九江年降水序列的分形

特征研究<sup>[7]</sup>, 我国成灾面积的混沌特性分析<sup>[8]</sup>, 提出了开展洪水灾害时空分布演化复杂性研究的思路<sup>[9]</sup>, 研究洪水灾害行为的时空分布规律、成灾机理, 形成洪水灾害预测模拟、分析的综合集成方法<sup>[10]</sup>. 在上述研究工作的基础上, 本文从复杂适应系统(complex adaptive system, CAS)的原理出发, 借助于 Swarm 平台, 构造了洪水灾害空间演化的模拟模型, 并针对不同的初始条件, 开展了模拟实验研究.

## 1 基本原理

### 1.1 CAS 理论

复杂适应系统理论的提出对于人们认识、理解、控制、管理复杂系统提供了新的思路. CAS 理论包括微观和宏观两个方面. 在微观方面, CAS 理论的最基本的概念是具有适应能力的、主动的个体, 简称主体(agent). 这种主体在与环境的交互作用中遵循一般的刺激-反应模型, 所谓适应能力表现在它能够根据行为的效果修改自己的行为规则, 以便更好地在客观环境中生存. 这是 CAS 理论思想的精髓所在, 甚至可以用一句话来概括复杂性的产生机制——“适应性造就复杂性”<sup>[11]</sup>. 在

收稿日期: 2001 - 11 - 22; 修订日期: 2002 - 05 - 24.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(79900002); 国家自然科学基金与长江水利委员会联合资助重大项目(50099620).

作者简介: 魏一鸣(1968 -), 男, 江西人, 博士, 教授, 博士生导师.

宏观方面,由这样的主体组成的系统,在主体之间以及主体与环境之间的相互作用,表现出宏观系统的分化、涌现等种种复杂的演化过程.

Swarm 就是依据图 1 给出的基于 Multi-agent

的建模思路开发而成的. CAS 理论对于人们的思维方法具有不少启发,它的影响正逐步传播到各个领域<sup>[12,13]</sup>.

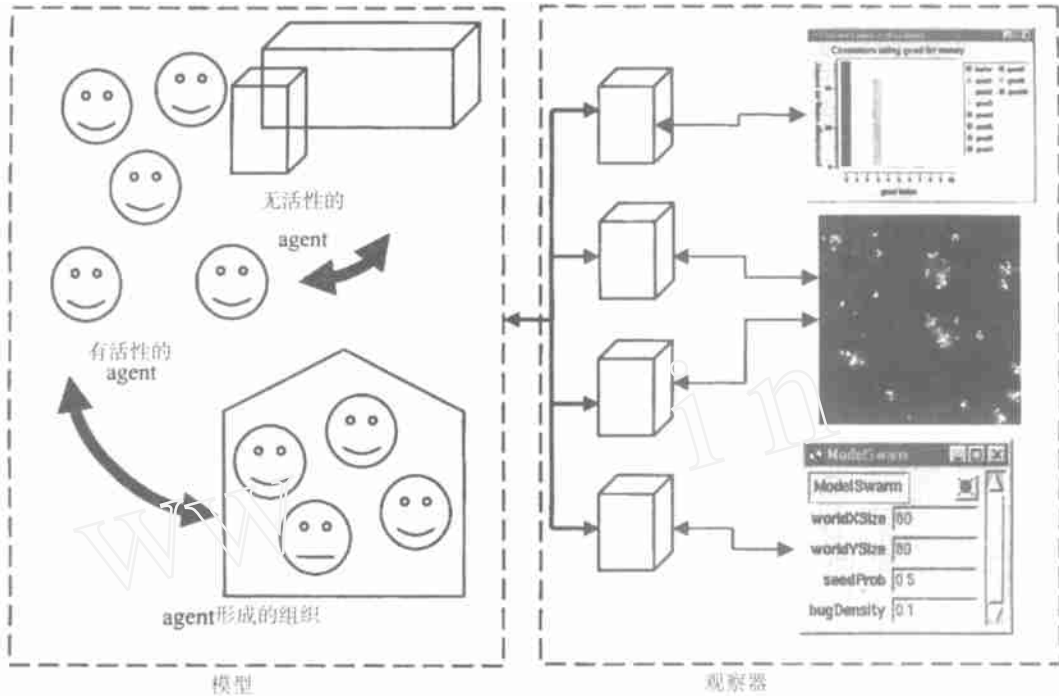


图 1 基于 Multi-agent 的建模方法

### 1.2 Swarm 模型

计算机系统模拟为 CAS 的定量研究提供了新的思路,计算机程序已经开始和科学仪器一同发挥着重要的作用.从 1994 年开始,桑塔费研究所(Santa Fe Institute)开展了一个研究项目<sup>[14]</sup>,以开发一个工具集来帮助科学家们分析复杂自适应系统,这个模拟工具集叫做 Swarm. Swarm 向研究人员提供了一套标准、灵活、可靠的软件工具,可以用来对复杂适应系统进行研究<sup>[15]</sup>.

Swarm 是一种支持“自下而上”(bottom-up)的建模工具.在 Swarm 中将模型涉及的参与者看作一个个主体(agent),首先描述各种主体细节,包括其属性、行为、对信息的评价、期望、学习过程和决策等.然后构建各类不同主体间的交互关系. Swarm 还提供一些输入/输出的接口,以便对系统模拟情况进行观察.组成 Swarm 模型的模拟部件之间也可以存在嵌套关系,这是通过一个被称为“Swarm”的对象来实现的.一个“Swarm”是一些主

体的集合以及这些主体行为的时间表. Swarm 代表了整个模型,包括主体及其在时间上的表现.它提供了一整套工具和一个驱动模拟的内核,研究人员可以自由定制 Swarm 中的多种对象,对系统在感兴趣的领域内建模. Swarm 实际上就是一个面向对象的类库,用户可以通过调用这些类库简化模拟工作.用户通过自己的程序中引入 Swarm 类建模. Swarm 类是用 Objective C 语言编写的,是一种面向对象的 C 语言.图形用户界面用 Tcl/ Tk 编写,这是一种用于编写窗口小部件的脚本语言.目前 2.1.1 版本的 Swarm 既可以用于 Unix/Linux 操作系统平台,也可以用于 Windows 95/98/NT/2000 操作系统平台.

Swarm 的基本建模思想是通过一系列独立的“主体”(agent)之间的独立事件相互作用进行模拟,考察和研究系统的行为和演化规律. Swarm 的模拟基本单位是主体,一个个主体就像是系统中的一个演员,是能够产生动作并影响自身和其他

本文中所有关于 Swarm 开发的技术介绍来自于关于 Swarm 的技术文档

主体的一个实体. 模拟中包括若干组交互的主体. 例如, 在经济学模拟中, 主体可能使公司、消费者、股票持有者或者银行机构等. 主体之间的交互行为的模拟与连续系统模拟不同. 在连续系统模拟中, 模拟现象是一组有关联的等式向量的关系.

主体定义了 Swarm 系统中的基本对象, 即模拟部件. 而 Swarm 通过一个时间表定义了这些对象之间的事件发生的流程. 在 Swarm 中, 特定的行为发生在特定的时间, 行为的发展按照时间的规定进行. 时间表 (schedule) 是一个数据结构, 其中包括各事件的执行顺序. 在事件表中, 对这 3 种行为按照以下顺序排序: “每天, 兔子先吃胡萝卜, 然后他们躲避狼的追踪, 最后狼试图吃兔子”. 模型按照这种安排好的事件执行顺序向前发展.

CAS 理论和 Swarm 平台提出不久, 但由于它们在模拟复杂系统行为的演化方面具有独到之处. 因此, 在经济、生物、生态与环境以及其他一些社会科学与自然科学交叉的领域<sup>[16-18]</sup>, CAS 理论和 Swarm 平台都得到了不同程度的应用和验证.

## 2 基于 Swarm 的洪水灾害演化模拟

### 2.1 模型与算法

基于 Swarm 的洪水灾害演化模拟模型用来模拟洪水灾害现象的演化过程, 理论上采用的是元胞自动机模型, Multi-agent 的建模思想. 在实际模拟过程中使用的是二维模型. 模型开发主要基于 Swarm 的类库, 用 Java 语言编写. 模型共包含 5 个文件, 如表 1 所示.

模型中用二维的网格表示水灾区域, 其中的每一个单元格表示一块“地”, 每一块地有自己的高度 (海拔)、蓄水能力 (蒸发或渗透) 等特定的指

标, 并且在模拟过程中这些指标并不变化. 二维的洪水泛滥模型的基本算法如下:

表 1 模型包括的文件及其作用

文件名称 (类)	作用
JFloodObserverSwarm.java	根类, 是 Model Swarm 的父类, 主要负责对模拟过程进行跟踪并以图形化的方式显示出来
JFloodModelSwarm.java	初始化模型, 并根据一定的算法进行模拟
JFloodStatistics.java	负责统计模拟过程中的一些技术统计数据
region.java	Agent 类, 是模拟的主体
StartJFlood.java	开始模拟程序

(1) 水最初从位于二维网格的上方中间或某个特定位置注入 (一般量比较大), 并向左、左下、下、右下、右 5 个方向蔓延. 模拟过程中, 对于任意的单元格, 水也是按照这 5 个方向蔓延的, 这 5 个方向上的单元格称为其“邻居”.

(2) 在模拟过程中的每一个时间步, 如果某一单元格当前的水量大于其蓄水能力时, 则该单元格被标志为“泛滥”, 并会依照下面的算法将洪水排出.

(3) 对于“泛滥”的单元格, 如果当前的水位 (地面高度 + 当前的水量) 比其邻居中的任意一个或多个单元格的水位高时, 则洪水会向低水位的邻居 (们) 蔓延 (首先注满最低的单元格), 直至两者水位相等或者本单元格的水量降低至蓄水能力为止.

(4) 对于“泛滥”的单元格, 如果邻居中没有任何一个单元格的水位较其低的时候, 则洪水不会流向其邻居, 而是聚在当前单元格 (类似湖泊).

(5) 模拟过程中, 如果某一单元格曾经被标志为“泛滥”一次或一次以上, 则该单元格同时被标志为“受灾”, 有即时的折线图统计成灾的格子总数 (面积).

### 2.2 初始参数的设置

模拟开始之前需要设定如下的参数, 如表 2 所示.

表 2 初始参数设置和其实际意义

参数名称	参数意义
gridSize	网格的大小, 本模型采用正方形网格, 所以只需要设定边长一个参数即可, 默认值为 40
MaxHG	最高和最低地面高度 (海拔), 地面的高度是随机生成的, 这两个参数确定随机数生成的范围, 默认值为 200
MinHG	~ 100
MaxPVW	最大和最小蓄水能力, 各单元格的蓄水能力参数也是随机生成的, 这两个参数确定随机数生成的范围, 默认
MinPVW	值为 20 ~ 1
Water	超始“泛滥”单元格注入水的数量, 决定成灾面积的大小, 默认值为 8 000
Choice	模拟类型选择, 取值范围 1 ~ 8, 标志各种类型的模拟

设置好上述参数后,可以开始模拟过程.图2及输入框的功能.示意了最初设置参数的控制面板界面、各个按钮

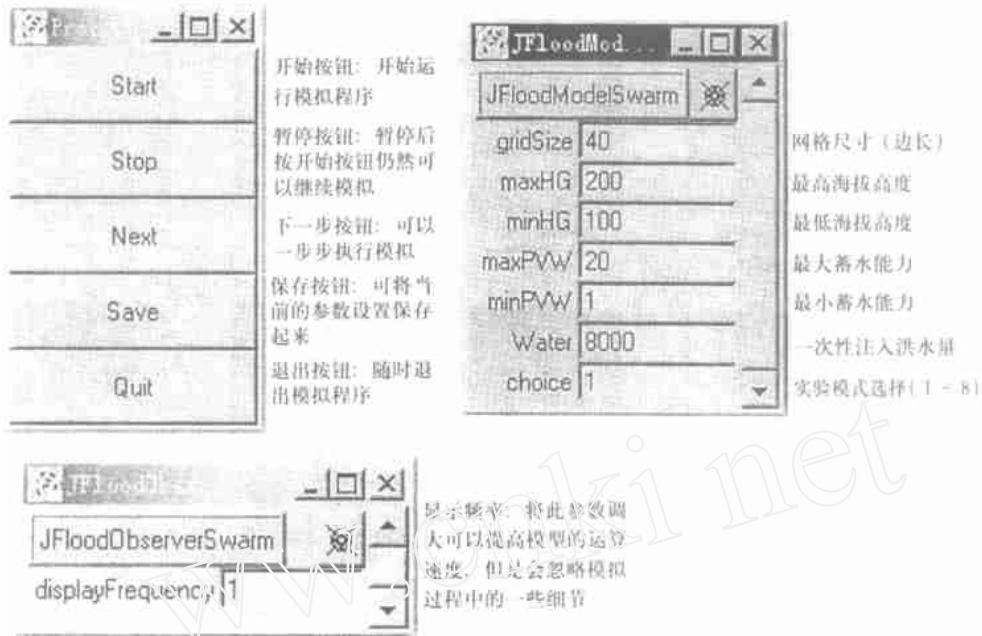


图2 模拟运行前的设置参数和模拟控制面板

### 2.3 模拟实验与结果

本文重点介绍8种类型的模拟实验,各种类型实验的主要区别在于初始地面的高度分布不同以及

初始注入水的单元格数量、位置不同,通过不同类型的多次模拟实验,观察各类模拟实验过程中洪水的蔓延情形和规律.图3示意实验的8种类型.

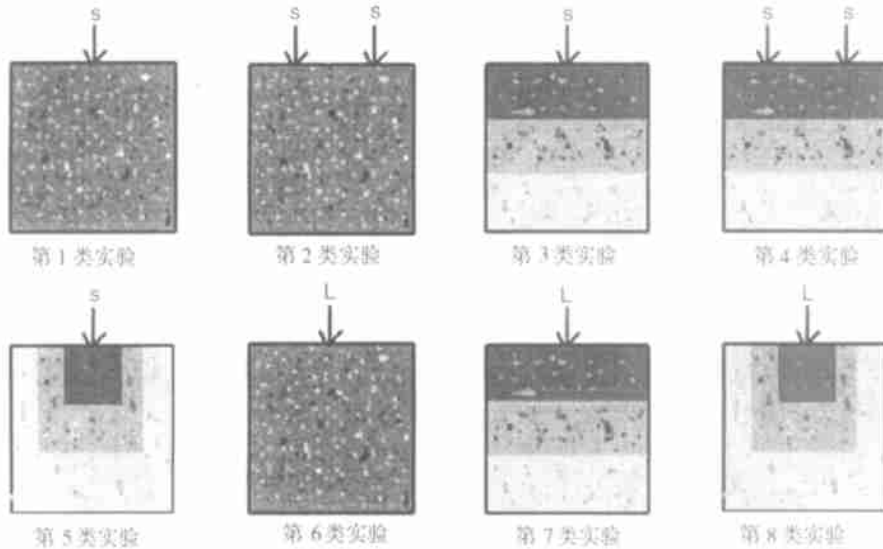


图3 8种类型的水灾模拟实验

图3中各类实验中箭头表示初始决口的数目和大致位置,“S”表示规模比较小的初始注入水量,“L”表示规模比较大的注入水量,方格中各类实验的地势分布是不相同的,有完全随机均匀分

布,例如图3中(1,2,6),有分成3个台阶形状的3-steps地势分布,例如图3中(3,4,7),也有类似小山形状的A-hill地势分布,例如图3中(5,8).本文根据这8种类型,分别做了多次实验.由于篇幅

限制,仅给出其中一次模拟过程中的演化图形,如图 4 所示.其他各次模拟实验的演化图形与图 4 类似.其中暗色的格子表示被洪水淹没的区域,暗

色的深浅代表淹没水深,模拟过程中一直在动态变化着.同时还有即时更新的折线图随时统计淹没区域的面积等参数.

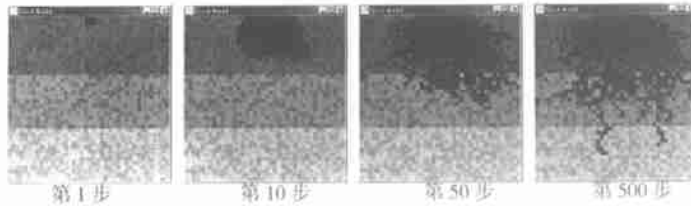


图 4 实验 3 的模拟结果示意图

对前述的 8 种类型,分别做了 5 次实验,表 3 给出的是这 8 类模拟实验数据平均统计结果,其中主要包括如下指标:

从开始到洪水蔓延至 100、200、300、400、500 和 1 000 格(面积)时经历的时间步数,用来描述洪水蔓延扩散的过程;

洪水最终稳定的时间,稳定的含义是指连续 30 时间步内,洪水面积没有进一步扩大;

洪水最终稳定时成灾面积,即按照前文提到的算法,被标志为“受灾”的格子数量;

洪水未波及的区域面积,即自始至终没有“受灾”的格子总数;

洪水稳定时仍然位于泛滥状态的区域面积;

洪水基本稳定时,受灾水位分别介于 0~9, 10~19, 20~29, 以及 30 以上的各个层次受灾格子的数量统计;

洪水基本稳定时,受灾地区中最深地方的受灾水位;

洪水蔓延过程到达的最远区域(距离).

8 类实验各项指标的具体统计结果如表 2 示.

表 2 实验模拟结果数据统计比较对照表

类型编号	1	2	3	4	5	6	7	8
洪水蔓延至 100 格的时间	7	5	7	5	7	7	7	7
洪水蔓延至 200 格的时间	20	7	13	7	12	12	11	10
洪水蔓延至 300 格的时间	87	10	25	9	19	20	16	14
洪水蔓延至 400 格的时间	—	19	45	13	30	36	21	19
洪水蔓延至 500 格的时间	—	50	108	20	57	76	29	26
洪水蔓延至 1 000 格的时间	—	—	—	174	—	—	185	146
洪水最终基本稳定的时间	296	595	364	518	211	545	493	298
最终成灾区域面积	333	661	540	1 093	566	628	1 077	1 068
未受洪水波及区域面积	1 267	939	1 060	507	1 034	972	523	532
稳定时仍处于泛滥状态区域面积	221	427	252	515	232	429	522	513
稳定时水位 CVW < 10 区域面积	165	329	460	905	484	287	880	844
稳定时水位 10 < CVW < 20 面积	58	103	61	154	65	105	156	177
稳定时水位 20 < CVW < 30 面积	45	114	7	18	4	103	21	27
稳定时水位 CVW > 30 面积	62	112	0	0	0	128	1	0
最深的水位	64	65	23	29	23	64	32	25
洪水到达的最远区域距离	28	35	33	39	31	38	39	38

## 2.4 结果分析与讨论

### 2.4.1 地势分布情况对洪水蔓延过程的影响

通过对上面统计结果中的 3 组实验——第 1、3、5 次实验,第 6、7、8 次实验,以及第 2、4 次实

验——模拟结果的比较,即当地势分布规律不同,其他实验条件基本相同时,所得到的关于洪水灾害时空演化的规律为:

**洪水蔓延速度** 在带有一定分布规律的地势

分布情况下,如实验3、5、7、8中,洪水的蔓延扩散速度比较快,尤其以第8次实验的蔓延速度为最快.实验3、5、7、8中采用的地势分布基本上都是水从高处流向低处的,这与现实中的实际情况也是吻合得比较好的.3组实验中洪水蔓延速度的比较分析如图5所示.

**最终成灾面积** 有地势分布规律的实验中,洪水最终扩散的面积要比随机分布的实验中最终成灾面积要大的多,基本上是后者的1.6~1.8倍以上.

**稳定时各水位层次区域面积** 在随机地势分布情形下,由于洪水扩散面积比较小,受灾地区中各水位高度层次上的区域面积大致相当,分布比较均匀;而带有一定地势分布规律的实验中,洪水蔓延得比较快,范围也比较广,因此在洪水基本稳定时,受灾地区中仍然处于高水位状态的比较少(多数为0),水位分布大多集中在0~10之间,即洪水已经得到了相当程度上的疏散.3组实验的比较分析示意图如图6所示.

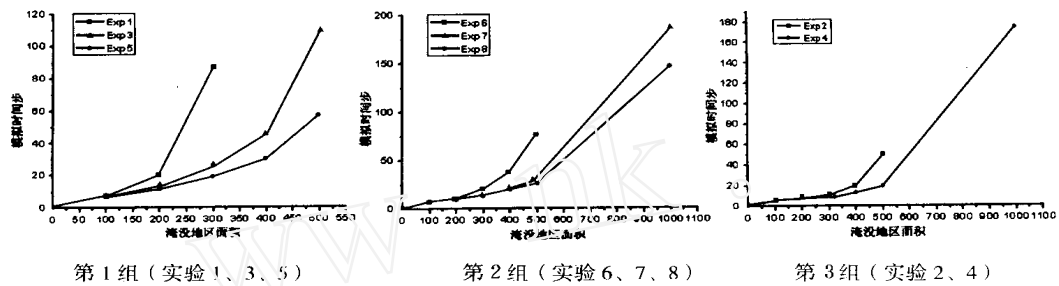


图5 洪水蔓延速度比较示意图

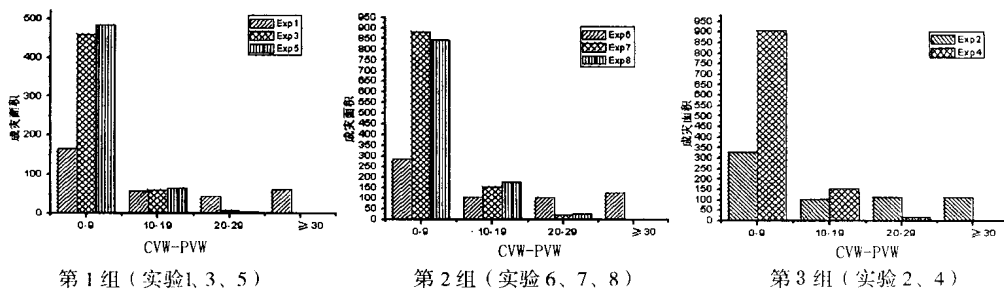


图6 洪水稳定时各层次水位区域数量分布比较示意图

**稳定时最深受灾水位** 由于随机地势分布情况下,洪水最终成灾面积相对较小,因此其稳定时最深成灾水位也就比较大;而带有分布规律的地势分布实验中,因为洪水扩散面积比较广,最深的水位相对较小.一般来说,前者是后者的2倍左右.

**洪水到达的最远区域距离** 各次实验模拟在这个指标上相差不大,但有迹象表明在随机分布地势的情形下,洪水波及的最远区域距离要略近一些.

2.4.2 初始注入水量对水灾蔓延过程的影响

统计结果中的另外3组实验——第1、6次实验,第3、7次实验,以及第5、8次实验的模拟结果

的比较,即对除初始注入水量不同之外,其他实验条件(如地势分布规律等)基本相同的各组实验的模拟结果进行的分析比较,也可以得出一些有实际意义的规律.

**洪水蔓延速度** 初始水量比较大时,洪水的蔓延速度要比初始水量较小时要快得多,而且初始洪水量比较大时,洪水最终稳定所需的时间比较长.

**最终成灾面积** 初始注入的水量大时最终的成灾面积也较大.同时在带有地势分布规律时,最终的成灾面积与最初注入水量之比相同,即提高一倍最初水量,最终成灾面积也相应扩大一倍左右.但是在随机分布地势,却并不完全符合这条

规律.

**稳定时各水位层次区域面积** 洪水基本稳定时,最初注入洪水数量较大的情况下,相应的各层次受灾水位的区域数目要较最初水量较小时多,而且在数量对比上与最初注入的水量之比相近.

**稳定时最深受灾水位** 通过比较可以发现,在洪水最终稳定时最深的受灾水位大致相当.这说明最初洪水注入的数量大小并不是影响洪水稳定时最深受灾水位的主要影响因素,最深受灾水位的深度主要取决于洪水的扩散情况,即地势分布情况,而与最初的水量没有太大关系.

**洪水到达的最远区域距离** 最初注入洪水量大时成灾面积更大,其波及的最远区域距离应该更远一些.在实际模拟过程中发现,当洪水量提高一倍时,无论其他条件如何,几乎都能够蔓延至原先不能够达到的最远距离区域.

#### 2.4.3 初始决口数目对水灾蔓延过程的影响

实际的水灾过程中,往往灾情严重的水灾并不是由简单的一个决口造成的.本文做了两次实验(实验2与实验4)模拟两个位置同时决口时洪水的蔓延和成灾情况.结论如下:

**洪水蔓延速度** 双口决口情形下洪水的蔓延速度最快.与初始注入水量相同的实验比较,其洪水的蔓延速度要快的多,且洪水最终稳定所需的时间比较长.

**最终成灾面积** 双口决口的情况下最终成灾面积最大.相同初始总注水量情况下,双口决口造成的成灾面积要较单口决口造成的成灾面积大一些.这也就意味着双口同时决口所造成的灾情极为严重,这点在实际的水灾过程中也是能够得到验证的.

**稳定时各水位层次区域面积** 洪水基本稳定时,最初注入洪水数量较大的其相应各个水位上的区域个数要较最初水量较小的多,而且其比例与最初注入的水量之比接近.

**稳定时最深受灾水位** 洪水最终稳定时,最深的受灾水位数值大致相当.这说明决口个数多少并不是影响洪水稳定时最深受灾水位的主要因素,最深受灾水位的深度主要取决于洪水的扩散情况,即模拟实验中的地势分布情况,而与决口个数和最初水量没有太大关系.

**洪水到达的最远区域距离** 排除最初注入水量因素,单口决口与双口决口洪水最终稳定时波及的最远区域距离大致相当.水量大时较最初注入较少水量时到达的距离要远.

### 3 结论

本文的研究工作建立了一个基于 Swarm 的洪水灾害时空演化模拟平台,结合洪水灾害时空演化的模拟实例,说明该技术的应用,得到了一些洪水灾害时空演化规律.但由于模型刚刚被开发出来,还有许多需要完善的地方,例如:

(1)进一步完善算法.目前是基于 JAVA 语言编写的,而且在算法设计上还有不完善之处,模型运行速度较慢,模拟实验需要的时间比较长,应进一步完善算法,提高运算效率,而且采用更加形象生动的用户界面.

(2)地势分布的改进.目前模拟只采用3个有代表性的地势分布情形.但在实际应用中,情况要复杂的多,应进一步引入更加丰富的地势分布规律,甚至将真实的地图抽象后嵌入模型中,得到更具有实际意义的规律.

(3)引入关于灾区的其他社会经济属性,开展洪水灾害风险评估.模型本身不断完善的同时,也可以考虑赋予模型中的各个地区(格子)以更加丰富的含义,以预测灾害的损失.例如,预测在不同的淹没水位时可能造成的损失、人员的伤亡等.进而利用模型开展灾害损失评估、预警等工作,为防洪减灾决策服务.

#### 参考文献:

- [1]魏一鸣.洪水灾害评估体系[J].灾害学,1997,(3):1—6
- [2]魏一鸣,范英,金菊良.洪水灾害风险分析的系统理论[J].管理科学学报,2001,(2):7—11
- [3]Rundle J. Workshop held on natural disasters[J]. EOS,1994,13:103
- [4]王顺义,罗祖德.混沌理论:人类认识自然灾害的工具之一[J].自然灾害学报,1992,(2):3—16

- [5]傅 军,丁 晶.洪水混沌特性初步研究[J].水科学进展,1996,(3):226—230
- [6]WEI Yiming. Neural network based predicative method for flood disaster[J]. Proceedings of 26<sup>th</sup> IE & C,1999,(1):730—735
- [7]魏一鸣.九江年降水序列的分形特征研究[J].江西科学,1998,(3):1—5
- [8]魏一鸣.中国大陆 1949—1991 年成灾面积的混沌特性研究[J].自然灾害学报,1998,(1):1—6
- [9]WEI Yiming. Thinking of the study on complexity in flood disaster[J]. Proceedings of International Symposium on Knowledge and Systems Sciences:Challenges to Complexity,2000,(10):255—261
- [10]WEI Yiming. The general frame of the system for analysis and evaluation of flood disaster[J]. Proceedings of 3rd-MS & IE,2000,(12):612—617
- [11]许国志,顾基发,车宏安.系统科学[M].上海:上海科技教育出版社,2000
- [12]刘和平,魏一鸣,等.复杂性科学及其在经济领域中的应用[J].中国管理科学,2000,11(8):248—254
- [13]John Holland.隐秩序[M].上海:上海科技教育出版社,2000.41—90
- [14]http://www.santafe.edu
- [15]http://www.swarm.org
- [16]McMullin B. SCL:An artificial chemistry in swarm[Z]. Available at :http://www.santafe.edu/sfi/publications/Working Papers/97-01-002
- [17]Terna P. Simulation tools for social scientists:Building agent based models with Swarm[Z]. Available at :http://www.soc.surrey.ac.uk/JASSS/1/2/4.html.
- [18]Kohler T A,Carr E. Swarm-based modeling of prehistoric settlement systems in Southwestern North America[A]. In:Proceedings of Colloquium II,UISPP XIIIth Congress[C]. Forli, Italy:1996

## Swarm based study on complexity in flood disaster

WEI Yi-ming, ZHANG Lin-peng, FAN Ying

Institute of Policy and Management, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China

**Abstract:** In complex adaptive system (CAS), the complex behavior of system is emerged from the bottom, that agents adaptability bottom-up the complexity of the entire system. This idea can be simulated by the method of computer aid simulation. Swarm is such a tools kit based on the bottom-up modeling method that can be used in CAS simulation on computer. This paper developed a Swarm based platform for the simulation of complexity in spatial and temporal evolvement of flood disaster. Its application is illustrated with a Swarm based model and program for simulating flood spreading. Some rules have been elicited from the experimental results, which could provide useful information for the disaster reduction and management.

**Key words:** complex adaptive system (CAS); simulation; Swarm; disaster management