

基于 ABM 与 ABS 的暴雨洪涝人口风险动态模拟^①

郭啸天^{1,2}, 李文波^{1,2}, 王海雷², 赖文泽^{1,2}, 史 杨^{1,2}, 孙丙宇²

¹(中国科学技术大学 自动化系, 合肥 230026)

²(中国科学院 合肥智能机械研究所, 合肥 230031)

摘 要: 暴雨洪涝灾害人口风险评估是一项复杂系统工程, 在防洪减灾工程理论与实践具有重要意义。针对灾害管理需要掌握暴雨洪涝人口灾情动态变化的问题, 采用智能体建模(Agent-Based Modeling, ABM)构建了暴雨洪涝人口风险模拟模型。在 Netlogo 平台上, 利用智能体仿真(Agent-Based Simulation, ABS)和构建的模型对淮河流域的暴雨洪涝人口风险动态变化进行仿真。仿真结果表明本文的方法能对暴雨的轻度、中度和重度三种人口风险进行动态分析。研究结果表明基于多智能体的模拟仿真能评估暴雨洪涝全过程的人口风险动态变化。

关键词: 暴雨洪涝; 人口风险; 动态模拟; 智能体建模; 智能体仿真

Population Risk Dynamic Simulation for Rainstorm Flood Disaster Based on ABM and ABS

GUO Xiao-Tian^{1,2}, LI Wen-Bo^{1,2}, WANG Hai-Lei², LAI Wen-Ze^{1,2}, SHI Yang^{1,2}, SUN Bing-Yu²

¹(Department of Automation, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

²(Institute of Intelligent Machine, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: As a complex system engineering, population risk assessment for rainstorm flood disaster has a very important significance on the theory and practice of flood control. Targeting on the problem that dynamic changes of population risk for rainstorm flood should be obtained by disaster management, this paper constructs population risk assessment model for rainstorm flood by using agent-based modeling (ABM) method. On NetLogo platform, agent-based simulation (ABS) and the constructed model are employed to simulate the population risk changes for rainstorm of the Huaihe River Basin. The simulation results show that the proposed model can dynamically analyze population risk under low-risk status, medium-risk status and high-risk status. The experimental results demonstrate that the dynamic changes of population risk in the whole process of rainstorm flood could be solved by using ABM and ABS.

Key words: rainstorm flood; population risk; dynamically simulate; agent-based modeling; agent-based simulation

洪涝灾害(水灾和涝灾)是我国和全球损失最严重的自然灾害之一^[1]。包括暴雨洪涝等的不同类型洪涝对我国造成了巨大人口损失^[2]。例如, 2010 年的洪涝共造成 3222 人死亡, 2012 年“7.21”北京特大暴雨洪涝造成北京 60.2 万人(次)受灾, 79 人死亡, 等等。因此, 对暴雨洪涝灾害孕育发生发展全过程中的人口风险进行动态模拟具有相当的迫切性和现实意义。

洪涝灾害属于典型的非常规突发事件, 往往涉及大量人员生命安全, 且社会与经济代价甚巨, 没有办法对其进行物理实验^[3]。现有的洪水演进^[4-6]、综合分

析^[7-11]等方法很难解决洪涝灾害人口风险的动态变化性和系统复杂性问题。模拟仿真具有可控安全、无破坏性、可多次重复、不受气候条件和空间与时间的限制等优点, 在自然灾害等非常规突发事件领域有着广泛的应用前景^[12]。从系统角度来看, 洪涝人口风险是洪涝灾害系统宏观涌现^[13], 并且洪涝人口风险模拟是典型“自然-社会”复杂系统^[12]。将复杂系统中的多智能体建模技术(Agent-based modeling, ABM)和模拟仿真引入到灾害风险评估中是进行风险动态分析的研究趋势之一。目前, 研究人员进行了积极探索^[14-17]。

① 基金项目:国家自然科学基金(41101516, 91324006, 91024008)

收稿时间:2015-03-24;收到修改稿时间:2015-05-18

本文充分考虑暴雨洪涝灾害人口风险形成过程中的动态变化性和系统复杂性,首先利用 ABM 技术对暴雨洪涝灾害系统中的致灾因子、孕灾环境、承灾体和风险等组成部分进行智能体建模。然后,重点研究暴雨洪涝孕育发生发展全过程中不同智能体(Agent)的作用规则和交互机制。最后在 NetLogo 仿真平台上对淮河流域的 729km² 区域内的暴雨洪涝人口风险进行动态模拟。本文方法能解决暴雨洪涝全过程中人口风险的动态变化性和系统复杂性。

1 暴雨洪涝灾害人口风险动态模拟

基于 ABM 的暴雨洪涝人口风险模拟模型主要由四类智能体联盟组成,分别为孕灾环境智能体联盟,致灾因子智能体联盟,承灾体智能体联盟以及人口风险分析智能体联盟。本文利用 ABM 对洪涝灾害复杂系统进行自上而下的微观建模,在微观上对洪涝灾害的致灾因子(降雨量、淹没深度等)、孕灾环境(高程、地形地貌等)和承灾体(人口、建筑物等)的状态和行为特征进行抽象^[13,17,18],并设计相应的智能体及其联盟。同时,构建人口风险分析多智能体体系。最后利用赋予数学形式表达的规则和逻辑推理机制确定各个智能体及联盟之间的相互作用关系,从而使不同的智能体之间产生互动,使得在宏观上实现针对暴雨洪涝灾害复杂系统的建模和仿真,从而动态模拟出暴雨洪涝灾害的人口风险。

1.1 孕灾环境智能体模型

以高程 Agent 为例说明孕灾环境模型,将高程 Agent 模型定义为六元组,即 $A=\{Elevation, WS, Rule, Action, State, Comm\}$,其中, *Elevation* 为智能体名称; *WS* 表示外部世界状况; *Rule* 为高程 Agent 作用规则; *Action* 为高程 Agent 具体动作; *State* 为高程状态; *Comm* 为高程 Agent 与孕灾环境智能体集合及其它孕灾环境智能体之间的通信方式。高程 Agent 以网格的形式存在于模型中,其高程参数用以描述研究区域的地形、坡向和坡度等地貌参数。

1.2 致灾因子智能体模型

以降雨量 Agent 为例说明致灾因子模型,并将降雨量 Agent 模型定义为六元组,即 $A=\{Rainfall, WS, Rule, Action, State, Comm\}$,其中, *Rainfall* 为智能体名称; *WS* 表示外部世界状况; *Rule* 为降雨量产生规则; *Action* 为降雨量生产动作; *State* 为降雨量状态; *Comm*

为降雨量 Agent 与致灾因子智能体集合及其它致灾因子智能体之间的通信方式。

1.2.1 降雨量 Agent 和水量 Agent 作用规则

根据暴雨管理模型(Storm Water Management Model, SWMM)模型^[19],暴雨强度 $i(t)$ 公式为:

$$i(t) = \frac{a[(1-c)T+b]}{(T+b)^{1+c}} \quad (1)$$

式中,其中 $a=167A_1(1+C\lg P)$, A_1 为重现周期为 1 年的降雨量, C 为雨量变动参数, P 为设计降雨重现周期, T 为暴雨历时, b 和 c 为常数, t 为时间。

引入雨峰系数 $r(0<r<1)$ ^[20]后,可将暴雨历时 T 划分为峰前和峰后,如下式所示:

$$i(t) = \begin{cases} \frac{a \times \left[(1-c) \times \left(\frac{T \cdot r - t}{r} \right) + b \right]}{\left(\frac{T \cdot r - t}{r} + b \right)^{1+c}} & 0 \leq t \leq T \cdot r \\ \frac{a \times \left[(1-c) \times \left(\frac{t - T \cdot r}{1-r} \right) + b \right]}{\left(\frac{t - T \cdot r}{1-r} + b \right)^{1+c}} & T \cdot r < t \leq T \end{cases} \quad (2)$$

当降水 Agent 根据上式随机出现在高程 Agent 上后,降水 Agent 将转化为雨水 Agent。而雨水 Agent 中的雨量会有一部分用于地表填洼、蒸发和渗透等各种损失。雨水 Agent 渗透率通过霍顿模型获取,如下:

$$f = f_c + f_0 \times e^{-kt} \quad (3)$$

式中, f_0 为初始下渗率, f_c 为稳定下渗率, k 为渗透衰减系数。 f_0 取值为 0.417~1.333(mm/min), f_c 取值为 0~0.167(mm/min), k 取值为 0.033~0.117^[21]。

1.2.2 水深 Agent 作用规则

某一时刻每个高程 Agent 的有效水深 H_{eff} 由该高程 Agent 在该时刻累积的雨水 Agent 的体积决定,同时还会被地表填洼等损失影响。

任意时刻,当某一网格的高程 D 与有效水深 H_{eff} 之和 H_{total} 不等于周边网格的高程与有效水深之和时,该网格与周边网格将会形成地表径流,其实际水深 H_{real} 将由该网格上有效降水水深 H_{eff} 与从该网格流向其他网格所损失的水深 H_{loss} 和从其他网格流入该网格水量所增加的水深 H_{add} 共同决定。

1.3 承灾体智能体模型

承灾体作为洪涝灾害致灾因子作用的对象,可将其分为人口、财产、房屋、农作物等^[13,17,18]。本文以暴雨洪涝人口风险动态模拟为研究目标,所以人口作为核心的承灾体。而房屋等作为人口 Agent 的重要“避险

设施”,故房屋也是本文重点关注的承灾体之一。这里以人口 Agent 为例说明承灾体模型,将人口 Agent 模型定义为七元组,即 $A=\{Population, WS, DB, Rule, Action, State, Comm\}$,其中, $Population$ 为智能体名称; WS 表示外部世界状况; DB 为数据库; $Rule$ 为外部数据状况; $Action$ 为人口 Agent 具体动作; $State$ 为人口状态; $Comm$ 为人口 Agent 与承灾体智能体集合及其它承灾体智能体之间通信方式。

人口 Agent 移动规则主要按照“向周围最安全区域移动”的原则来设定。在暴雨洪涝过程中,人口移动受到房屋等避险设施的影响。房屋和人口等 Agent 的受灾状态主要根据所处水深 H_{real} 值和受灾时间来综合判断,并将人口和房屋受灾状态划分为安全(Safe)、轻度风险(Low Risk)、中度风险(Medium Risk)和重度风险(High Risk)。

人口 Agent 移动规则主要针对处于有房屋区域和空地区域两种不同环境条件。对于人口 Agent 处于有房屋区域中,考虑两种情况,分别为人口自身在房屋中和人口自身不在房屋中,其移动规则如图 1 所示。

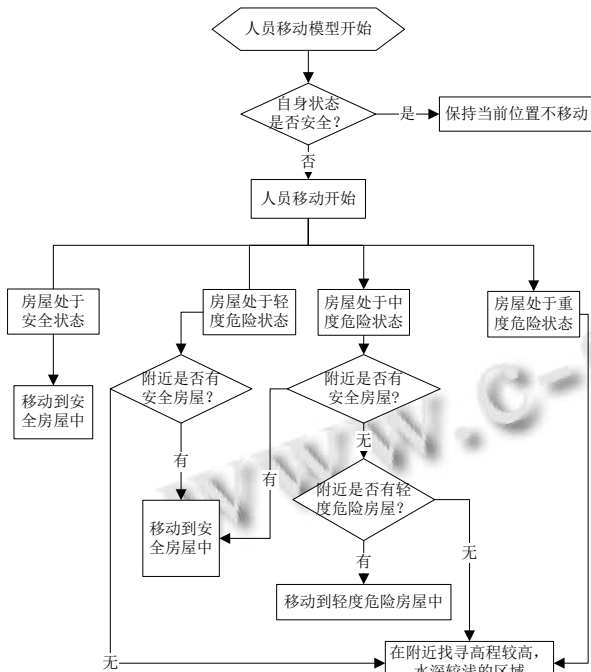


图 1 处于有房屋区域人口 Agent 移动策略

如图 1 所示,处于有房屋区域人口 Agent 的移动规则为:

1)根据自身状态判断是否需要制定移动的策略,

当安全时,则保持不动;当不安全时,则选择移动;

2)当所在网格中的房屋处于安全状态,则直接移动到或保持处于房屋中;

3)当所在网格中的房屋处于轻度危险状态时,判断周边是否有安全房屋;如果有则向安全房屋方向移动;如果没有,则向高程比较高和积水比较浅的方向移动;

4)当所在网格中的房屋处于中度危险,首先判断周边是否有安全房屋;如果有则向安全房屋方向移动;如果没有,则判断是否有轻度危险的房屋,如果有则向轻度危险房屋方向移动;如果周围也没有轻度危险房屋则向高程比较高和积水比较浅的方向移动;

5)当所在网格中的房屋处于重度危险时,直接向高程比较高和积水比较浅的方向移动。

以人口 Agent 所处网格中的房屋处于轻度危险状态为例,说明处于有房屋区域轻度危险状态人口 Agent 移动策略,如图 2 所示。

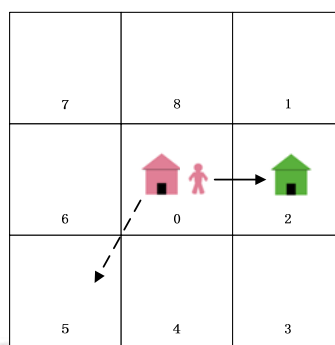


图 2 处于有房屋区域的轻度危险状态人口 Agent 移动策略示意图

由图 2 所示,设房屋 Agent 和人口 Agent 为轻度危险(粉色,都处在网格 0 区域)时,则人口 Agent 具体移动策略为(1)当周围存在安全(绿色)房屋时,该人口 Agent 向该安全房屋区域(网格 2)移动,如图直线箭头所示。(2)当人口 Agent 周围不存在安全房屋时,选择向周围高程较高和积水较浅的区域移动。假若网格 0 周边最大的高程或有效水深 H_{eff} 最小的为网格 5,则人口 Agent 则向网格 5 区域移动,如图虚线箭头所示。

对于处于空地区域的人口 Agent,其移动规则如图 3 所示,具体为:

1)根据自身状态判断是否需要制定移动的策略,当安全时,则保持不动;当不安全时,则选择移动;

2)当人员处于轻度危险时,判断周围是否有安全房屋,如果有则向安全房屋方向移动;如果没有则向高程比较高和积水比较浅的方向移动;

3)当人员处于中度危险时,首先判断周围是否有安全房屋;如果有则向安全房屋方向移动;如果没有则判断是否有轻度危险的房屋,如果有则向轻度危险房屋方向移动;如果没有则向高程比较高和积水比较浅的方向移动;

4)当人员处于重度危险时,首先判断周围是否有安全房屋;如果有则向安全房屋方向移动;如果没有则判断是否有轻度危险的房屋,如果有则向轻度危险房屋方向移动;如果没有则向高程比较高和积水比较浅的方向移动。

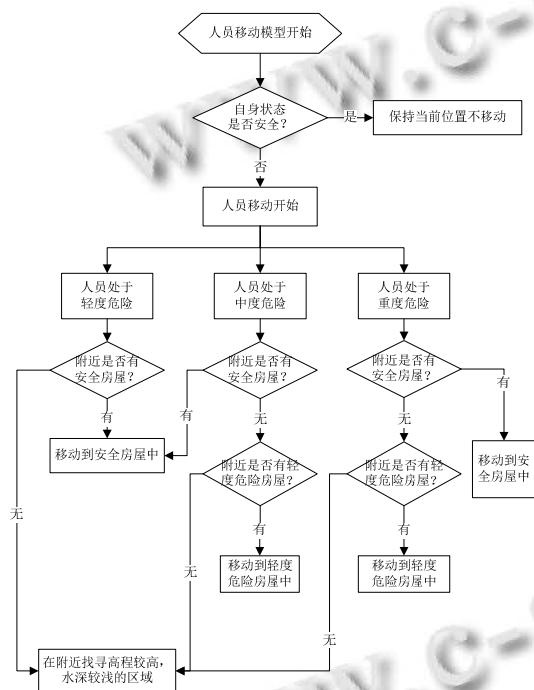


图3 处于空旷区域人口 Agent 移动策略

处于空地度域的轻度危险状态人口 Agent 移动策略如图4所示。

由图4所示,处于空旷区域的轻度危险状态人口 Agent 移动策略为(1)当周围存在安全(房屋时绿色,网格2),人口 Agent 向该安全房屋区域移动,如图直线箭头所示。(2)当周围不存在安全房屋时,如果人口 Agent 周围最大的高程或有效水深 H_{eff} 最小的为网格5,则人口 Agent 的移动策略如虚线箭头所示。

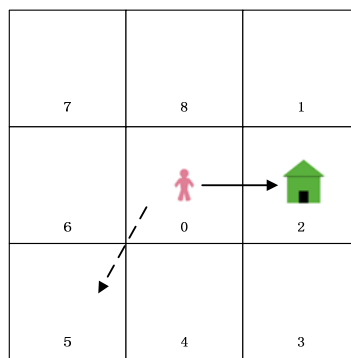


图4 处于空旷区域的轻度危险状态人口 Agent 移动策略示意图

1.4 人口风险分析智能体模型

人口风险分析智能体主要对承灾体人口 Agent 的受灾情况进行统计分析。本文将人口风险分析 Agent 模型定义为七元组,即 $A=\{PopuRiskAnalyze, WS, DB, Rule, Action, State, Comm\}$, 其中, $PopuRiskAnalyze$ 为智能体名称; WS 表示外部世界状况; DB 为数据库, $Rule$ 为统计规则; $Action$ 为统计不同人口状态的动作; $State$ 为某一时间统计分析是否完成状态; $Comm$ 为人口风险分析 Agent 与其它智能体之间通信方式。

根据上文对承灾体人口 Agent 和房屋 Agent 受灾状态等级划定,人口风险分析 Agent 作用规则如下所示:

- 1)通过感知部分获取环境中人口 Agent 状态信息;
- 2)根据所获得人口 Agent 的状态信息分别对安全人口、轻度危险人口、中度危险人口和重度危险人口进行统计分析,并将统计后的状态信息进行反馈;
- 3)最后将反馈的统计结果提供给人口风险分析 Agent 集合,完成对人口 Agent 的风险统计。

1.5 智能体之间协调协作及通信机制设计

多智能体协调是指具有不同目标的多个智能体对其目标、资源等进行合理安排,以协调各自行为,最大程度上实现各自目标。多智能体协作是指多个智能体通过协调各自的行为,合作完成共同的目标。总之,在多智能体协调协作环境中,智能体的行为策略不仅要考虑自己的行为,而且必须将自身的行为策略看作是对其他智能体联合行为策略的最优选择。多智能体之间的通信是实现不同智能体之间相互作用和协调协作的基础。本文利用 KQML(Knowledge Query and Manipulation Language)作为各智能体之间的通信语言,

以实现不同智能体之间的相互作用和协调协作。

2 试验与分析

基于本文构建的模型,以淮河流域的 729km² 为实验区域,在多智能体模拟仿真平台上对实验区域的暴雨洪涝灾害人口风险动态变化进行模拟。

2.1 仿真模型平台的选择

目前已有的多智能体模拟仿真平台主要包括 NetLogo、Swarm 和 Repast 等,如表 1 所示。对于“自然—社会”交互比较频繁复杂系统的模拟仿真,需要仿真平台具有以下标准^[22,23]: 1)能够表示连续或离散空间概念及其拓扑关系; 2)能表达多层析组织之间复杂关系; 3)能与自然科学、社会科学等领域的研究成果进行融合; 4 能处理事件发生的时序机制,能够解决地理现象中的时空非均匀性和动态变化性。由于暴雨型洪涝灾害人口风险模拟仿真是典型的“自然—社会”型复杂系统,故基于上述标准,本文选择 NetLogo 平台对暴雨洪涝灾害人口风险进行模拟仿真。

表 1 多智能体模拟仿真平台对比

平台	NetLogo	Swarm	Repast	Ascape	JADE
语言	Logo	Java/Objective C	Java	Java	Java
操作系统	Windows/Macintosh/Linux/UNIX	Windows/Macintosh/Linux/UNIX	Windows/Macintosh/Linux/UNIX	Windows/Macintosh/Linux/UNIX	Windows/Macintosh/Linux/UNIX
应用领域	生物学、地球学、社会学等领域的模拟仿真平台,特别适合随时间演变的复杂系统仿真	适应自然科学、社会科学、商业应用等复杂系统的离散事件仿真	适应社会学、灾害学、生态环境等模拟仿真	社会科学、经济学系统	适合自然科学和社会科学系统的仿真
使用要求	编程要求较低	编程要求较高	需要 Java 编程基础	需编程技能改造模型	需要 Java 编程基础

2.2 暴雨洪涝全过程人口风险动态模拟

本文基于 NetLogo 平台的暴雨型洪涝灾害人口风险模拟仿真流程如图 5 所示。

针对研究区域淮河流域,按照“高程越高的区域,

其人口分布越少”的现实情况,同时考虑研究区域人口的分布密度来合理初始化人口 Agent 等承灾体,以上两类承灾体 Agent 初始化结果为人口 Agent 共 4332 个,其中每一个人口 Agent 可代表多个现实人口;房屋 Agent 共 1525 个。

模拟按照前文论述的降雨量 Agent 致灾因子生产规则,取公式(2)中的雨峰系数 r 为 0.5,在研究区域按照峰前和峰后产生降雨量,使得孕灾环境地表具有一定的水深深度,从而影响承灾体人口的安全状况并使得其处于某种受灾状态。

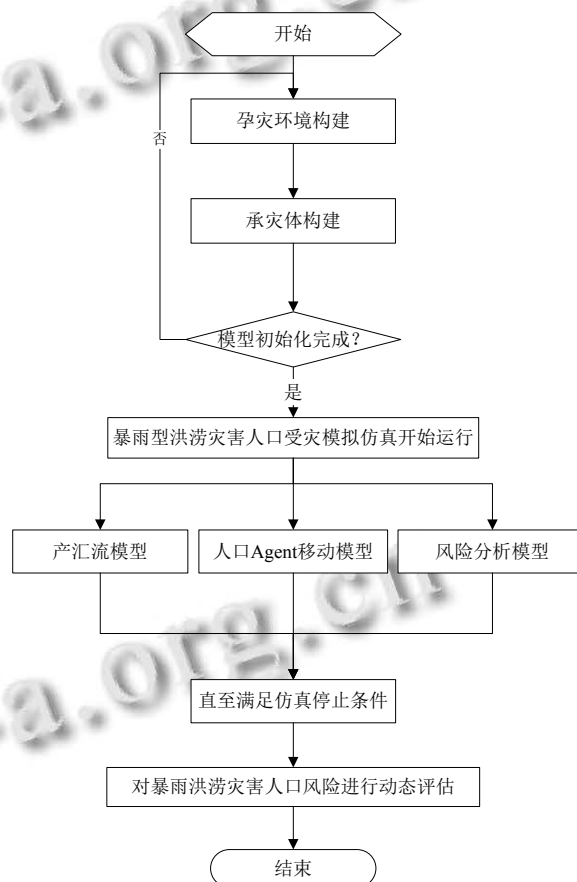


图 5 暴雨洪涝灾害人口风险动态模拟算法流程

总模拟暴雨洪涝 36h, 其中降雨时间为 24h, 包括峰前 12h 和峰后 12h, 降雨停止后继续运行时间为 12h, 以获得降雨停止后承灾体人口 Agent 的“恢复”情况。

以 2h 为采样间隔, 实验区域在暴雨洪涝全过程的安全人员、受灾人口、轻度受灾人口、中度受灾人口和重度受灾人口动态模拟结果如表 2 所示。其中, 受灾人口为轻度受灾人口、中度受灾人口和重度受灾人口数量之和。

表 2 暴雨洪涝灾害人口风险动态模拟结果

时 间	安全人 口	受灾人 口	轻度受 灾人口	中度受 灾人口	重度受 灾人口
2h	4246	86	84	2	0
4h	4062	270	151	114	5
6h	3846	486	284	175	27
8h	3821	511	225	235	51
10h	3796	536	220	235	81
12h	3843	489	201	184	104
14h	3823	509	192	205	112
16h	3860	472	171	175	126
18h	3856	476	174	183	119
20h	3965	367	152	124	91
22h	3995	337	134	112	91
24h	4011	321	125	125	71
26h	4082	250	95	120	35
28h	4128	204	81	117	6
30h	4145	187	128	58	1
32h	4174	158	134	24	0
34h	4210	122	112	10	0
36h	4251	81	72	9	0

2.3 暴雨洪涝全过程人口风险动态变化分析

将暴雨洪涝模拟仿真运行过程分为三个阶段, 分别为模拟仿真前期、中期和后期. 其中, 模拟前期对应于降雨开始至雨峰前期的 12h, 模拟中期对应于降雨峰后的 12h, 模拟后期对应于降雨停止至模拟仿真结束的 12h. 将五种不同程度的人口数量(安全状态、受灾人口、轻度受灾人口、中度受灾人口和重度受灾人口)所占总人口的比例进行统计分析. 其中暴雨过程中的 2h、6h、12h、18h、24h、30h 和 36h 五种状态人员 Agent 统计结果如图 6 和图 7 所示.

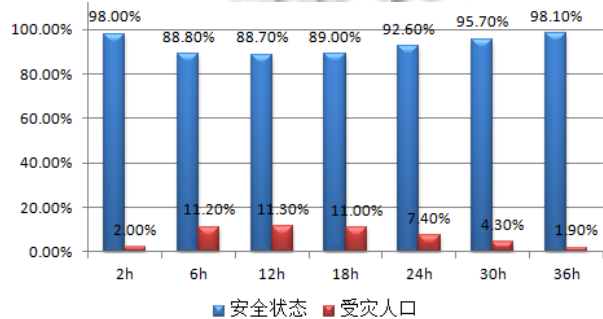


图 6 暴雨洪涝全过程安全与受灾人口统计结果

从表 2 和图 6 可知, 处于安全状态的人口在模拟

的前期呈现逐步降低趋势, 在模拟中期和后期呈现逐步增长的趋势; 处于受灾状态的人口变化趋势与处于安全状态的人口相反. 从表 2 和图 6 可知, 处于受灾状态的人口在模拟的前期和中期之间达到峰值, 如表 2 中 14h 时的 509 个人口 Agent 处于受灾状态, 并占总人口 Agent 的 11.7%.

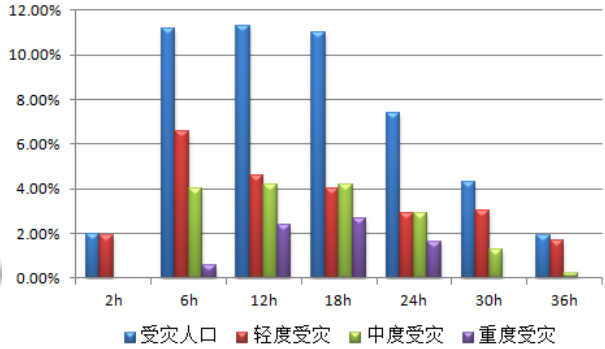


图 7 暴雨洪涝全过程不同受灾状态人员统计结果

从表 2 和图 7 可知, 对于处于轻度受灾人口来说, 在暴雨洪涝前期的 2h 就开始出现, 在暴雨中期达到高峰, 并延续到暴雨后期, 其峰值出现在暴雨前期的 6h, 占总人口 Agent 的 6.6%. 对于处于中度危险的人口 Agent, 在模拟的前 12h 呈现逐步增长趋势; 在模拟的后 24h 为逐步降低, 其峰值出现在暴雨前期的 8h 和 10h, 占总人口 Agent 的 5.4%. 而处于重度危险状态的人口 Agent 则在模拟的 4h 后开始出现, 并在暴雨中期的 16h 达到峰值, 占总人口 Agent 的 2.9%; 然后逐步降低, 在模拟的后期逐步降低为 0. 对于模拟过程的任何一个统计时间点, 处于轻度危险的人口 Agent 均比处于中度危险的人口 Agent 或处于重度危险的人口 Agent 多, 而处于中度危险状态的人口 Agent 又比重度危险状态的人口 Agent 多.

通过上述分析可知, 模拟刚刚开始降雨时, 只有少部分人口 Agent 处于受灾状态, 且此时受灾人口的受灾状态几乎全部处于轻度受灾. 随着致灾因子降雨 Agent 增多, 对人口 Agent 的影响加大, 处于轻度和中度受灾人口比例增大, 并开始出现少量人口 Agent 处于重度受灾, 且处于重度受灾状态的人口比例随着时间逐渐增大. 停止产生致灾因子降雨 Agent 后, 处于重度受灾状态的人口 Agent 递减直至为零, 但处于中度受灾和轻度受灾状态的人口 Agent 波动性较大, 是因为人口 Agent 的受灾得到缓解, 并有处于重度受灾

和中度受灾状态分别变为处于中度受灾和轻度受灾状态,从整体上来说受灾人数的比例逐渐下降,安全人数比例逐渐上升。

3 结语

针对灾害管理对于暴雨洪涝人口风险动态评估的实际需求,本文在已有洪涝灾害风险评估研究成果的基础,采用智能体建模技术对暴雨洪涝灾害系统进行分析;构建了基于多智能体的暴雨洪涝人口风险动态模拟模型。

在 Netlogo 模拟仿真平台上,以淮河流域的 729km² 为实验区域,对暴雨洪涝的前期、中期和后期不同阶段的人口风险进行模拟。模拟结果表明所构建的模型对暴雨全过程中的轻度、中度和重度三种不同受灾状态的人口风险能进行动态分析。实验结果证明基于 ABM 和 ABS 方法能动态评估暴雨洪涝灾害全过程的人口风险动态变化,能解决暴雨洪涝过程中人口风险的系统复杂性和动态变化性,有助于进一步地研究分析暴雨洪涝灾害类复杂系统。

虽然本文的方法能对暴雨洪涝的人口风险进行动态模拟,但利用 ABM 和 ABS 对暴雨洪涝灾害进行人口风险模拟仿真的相关研究刚刚起步,目前还有一些问题需要解决和完善。如需要利用洪涝灾区的人口灾情对研究结果进行验证和完善;利用 ABS 和 ABM 对溃坝型和冰雪融水型等其他类型洪涝人口风险进行模拟仿真和动态评估。以上问题解决需要 ABM、ABS、地理学、灾害学和水文学等综合交叉综合才能有效解决。对于溃坝型洪涝人口风险模拟仿真则需要利用模 ABS、ABM、溃坝模型和洪水演进模型^[6]来构建 Agent 模型和作用规则;利用融雪径流模型^[24]等解决冰雪融水型洪涝人口风险动态模拟问题。所以,后续研究重点是在 Netlogo 平台,对暴雨型洪涝灾害孕育发生发展过程中的人口风险风险进行精细化评估,验证完善本文所构建的模型;综合利用融雪径流模型、溃坝模型、洪水演进模型、ABS 和 AMB 等分别对融雪和溃坝等其它型洪涝人口风险进行模拟仿真和动态评估。

参考文献

- 1 蒋卫国,李京,陈云浩,盛绍学,周冠华.区域洪水灾害风险评估体系(I)-原理与方法.自然灾害学报,2008,17(6):105-109.
- 2 赵飞,汪洋,刘南江,张妮娜.2000-2012 年我国自然灾害人口

损失情况特征分析.灾害学,2013,28(4):139-142.

- 3 王飞跃,邱晓刚,曾大军,曹志冬,樊宗臣.基于平行系统的非常规突发事件计算实验平台研究.复杂系统与复杂性科学,2010,7(4): 1-10.
- 4 Buchele B, Kreibich H, Kron A, Thieken A, Thringer J, Oberle P, Merz B, Nestmann F. Flood risk mapping: contributions towards an enhanced assessment of extreme events and associated risks. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2006, 6(4): 485-503.
- 5 Apel H, Thieken AH, Merz B, Blöschl G. A probabilistic modelling system for assessing flood risks. Natural Hazards, 2006, 38(1-2): 79-100.
- 6 杨佩国,杨勤业,吴绍洪,马欣,康相武,夏富强,戴尔阜.基于数值模拟的黄河下游不同情景溃堤洪水特性.地理研究,2007, 26(2):328-336.
- 7 尹占娥,暴雨杰,殷杰.基于 GIS 的上海浦东暴雨内涝灾害脆弱性研究.自然灾害学报,2011,20(2):29-35.
- 8 薛晓萍,马俊,李鸿怡.基于 GIS 的乡镇洪涝灾害风险评估与区划技术-以山东省淄博市临淄区为例.灾害学,2012,27(4): 71-74.
- 9 段光耀,赵文吉,宫辉力.基于遥感数据的区域洪涝风险评估改进模型.自然灾害学报,2012,21(4):57-61.
- 10 夏智宏,周月华,史瑞琴,李兰,高伟,叶丽梅.基于 MapGIS 的暴雨洪涝风险评估系统设计与实现.自然灾害学报,2014, 23(3):132-137.
- 11 丁志雄,王义成.基于遥感与 GIS 的堰塞湖库区淹没分析与灾害评估.水利水电技术,2008,39(10):116-120.
- 12 邱晓刚,樊宗臣,陈彬,曹志冬,王飞跃.非常规突发事件应急管理仿真的需求与挑战.系统仿真技术,2011,7(3):169-176.
- 13 史培军.四论灾害的理论与实践.自然灾害学报,2005,14 (6):1-7.
- 14 王飞,尹占娥,温家洪.基于多智能体的自然灾害风险动态评估模型.地理与地理信息科学,2009,25(2):85-88.
- 15 章振,孙丙宇,李文波.基于多智能体的森林火灾人员疏散仿真.计算机系统应用,2013,22(6):157-160.
- 16 Dawson RJ, Peppe R, Wang M. An Agent-based model for risk-based flood incident management. Natural Hazards, 2011,59(1): 167-189.
- 17 Linghu B, Chen F, Guo X, Li W. A Conceptual Model for Flood Disaster Risk Assessment Based on Agent-Based

- Modeling. Computer Sciences and Applications (CSA), 2013 International Conference on. IEEE, 2013: 369–373.
- 18 史培军.再论灾害的理论与实践.自然灾害学报,1996,5(4): 6–17.
- 19 张大伟,赵冬泉,陈吉宁,王浩正,王浩昌.芝加哥降水过程线模型在排水系统模拟中的应用.给水排水,2008,34(S1): 354–357.
- 20 任伯帜.城市设计暴雨及雨水径流计算模型研究[学位论文].重庆:重庆大学,2004.
- 21 赵冬泉,王浩正,陈吉宁,王浩昌.城市暴雨径流模拟的参数不确定性研究.水科学进展,2009,20(1):45–51.
- 22 Parker DC, Manson SM, Janssen MA, Hoffmann MJ, Deadman P. Multi-agent systems for the simulation of land-use and land-cover change: a review. Annals of the Association of American Geographers, 2003, 93(2): 314–337.
- 23 黎夏.地理模拟系统:元胞自动机与多智能体.北京:科技出版社,2007.
- 24 王超,赵传燕,冯兆东.黑河上游不同流域融雪过程的 SRM 模拟.兰州大学学报(自然科学版),2011,47(3):1–8.