

李文波, 郭啸天, 毛雪岷, 等. 基于多智能体的暴雨洪涝人口风险动态评估[J]. 灾害学, 2015, 30(3): 080-087. [Li Wenbo, Guo Xiaotian, Miao Xuemin, et al. The dynamic population risk assessment model for rainstorm-flood utilization multi-agent [J]. Journal of Catastrophology, 2015, 30(3): 080-087.]

基于多智能体的暴雨洪涝 人口风险动态评估*

李文波¹, 郭啸天^{1,2}, 毛雪岷³, 肖丹⁴, 赖文泽^{1,2}, 王海雷²

(1. 中国科学院合肥智能机械研究所, 安徽 合肥 230031; 2. 中国科学技术大学 自动化系, 安徽 合肥 230027;
3. 合肥工业大学 管理学院, 安徽 合肥 230036; 4. 贵州财经大学 贵州省经济系统仿真重点实验室, 贵州 贵阳 550025)

摘要: 面向灾害管理实际工作对洪涝人口风险进行动态评估的需求, 利用复杂系统中的智能体建模方法 (Agent-based Modeling, ABM) 构建基于 ABM 的暴雨洪涝人口风险动态评估模型, 对暴雨全过程中的人口风险进行动态定量评估。该文对所构建的模型中涉及到的致灾因子、孕灾环境、承灾体和人口风险分析等 Agent 的模型与作用规则进行深入分析; 然后在 Netlogo 平台上, 对淮河流域上鲁山县的暴雨洪涝全过程中的人口风险进行模拟仿真和评估, 验证了所构建模型的有效性。研究结果为暴雨洪涝灾害人口风险动态分析提供了新的思路。

关键词: 暴雨; 洪涝灾害; 人口; 风险; 动态评估; 多智能体; 模型

中图分类号: X43; P333.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2015)03-0080-08

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2015.03.016

洪涝(包括洪灾和涝灾)是全球和我国损失最严重的自然灾害^[1]。公元前 206-1949 年, 我国共发生过有历史记录的洪涝 1 029 次, 1117 年的黄河洪涝造成 100 多万人死亡。1949-1999 年, 洪涝共造成 279 968 人死亡^[2]; 其中, 1975 年 8 月淮河流域的“台风-暴雨-溃坝”洪涝造成河南省 29 个县市的 1 100 万人受灾, 2.6 万人死亡; 1998 年特大洪涝灾害共造成我国 29 个省(区、市)的 2.23 亿人(次)受灾, 死亡 3 004 人。2000-2012 年间, 包括暴雨等在内的不同类型洪涝灾害共造成 91 646 万人(次)受灾、18 950 人死亡^[2]。特别是 2012 年“7.21”北京特大暴雨洪涝造成北京 60.2 万人受灾, 79 人死亡, 经济损失 116.4 亿元, 等等。面对如此严峻的形势急需加强对洪涝风险进行评估。

洪涝风险评估方法可划分为洪水演进^[3-6]、模拟仿真^[7-9]、基于 RS(遥感)和 GIS(地理信息系统)的综合分析^[10-15]和复杂系统建模^[16-18]等。洪水演进法是从灾害学的角度研究出发, 主要利用水力学模型或水文学模型研究洪涝风险^[18]。水力学模型以圣维南方程组为基础, 而水文模型主要利用统计学为工具研究洪水风险的内在规律。水文模型中计算出的风险为实际来水量大于某一特定值的概率, 它与常用“抗御多少年一遇的洪水”

的概念是一致的。国内外研究学者利用洪水演进法在洪水风险评估中取得了可喜的研究成果^[3-6]。随着技术发展, 利用洪水演进和模拟技术研究洪涝风险也取得了可喜成果^[7-9]。为了解决洪涝灾害风险空间上的非均匀性, 学者在洪水演进和模拟的基础上利用 RS/GIS 对洪涝灾害风险进行综合研究, 并取得显著的成果^[10-14]。洪涝风险评估是典型“自然-社会”复杂系统^[18], 从系统角度来看, 洪涝风险是洪涝灾害系统宏观涌现^[15]。目前, 学者尝试将复杂系统建模中的智能体建模方法 (Agent-based modeling, ABM) 引入到洪水灾害风险评估^[16-18]。如, 王飞等构建了基于 ABM 的自然灾害风险评估框架^[16], Dawson 等利用 ABM 对溃坝型洪涝人口风险进行模拟^[17], Linghu 等研究了基于 ABM 的暴雨洪涝风险动态评估概念模型^[18], 等等。

总的来说, 目前洪涝风险评估成果概括起来为“某个流域或地区发生多少年一遇的洪涝灾害的概率是多少, 以及在这样的概率下造成的损失是多少”。已有洪涝风险评估结果多为灾前静态定性风险分析或灾后定量损失估算, 而较少考虑致灾因子、孕灾环境和承灾体在风险形成过程中的多

* 收稿日期: 2015-02-06 修回日期: 2014-03-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(41101516, 91324006, 91024008); 贵州科技计划项目(黔科合 SY 字[2012]3040)

作者简介: 李文波(1979-), 男, 湖北襄阳人, 博士, 副研究员, 主要从事洪水风险评估、复杂系统建模、水资源管理等方面研究。E-mail: wbli@iim.ac.cn

通讯作者: 毛雪岷(1974-), 男, 安徽宿州人, 博士, 副教授, 主要从事人工智能、复杂系统建模等方面研究。

E-mail: maouxuemin@yahoo.com.cn

样不确定性、动态变化性和系统复杂性^[18]。然而, 灾害管理实际需求根据洪涝风险动态变化情况, 采用相应的应急救援措施。面向洪涝灾害管理实际需求, 将 ABM 应用到洪涝灾害风险评估中, 构建洪涝风险动态评估模型是未来的发展方向之一。

本文重点研究基于 ABM 的暴雨型洪涝人口风险动态评估模型, 并通过仿真平台对所构建的模型进行验证分析。在该模型中, 首先利用 ABM 建模思想构建暴雨洪涝灾害多智能体系统; 并利用洪水演进和综合分析研究成果构建智能体之间的相互作用关系; 最后通过模拟仿真方法评估暴雨洪涝孕育发生发展过程中动态风险; 该方法预期能将目前已有的洪涝风险评估方法有机统一到洪涝风险动态评估中。本文研究成果预期能对暴雨洪涝灾害发生发展全过程中的人口风险进行动态评估, 研究成果能为洪涝灾害期间的人口转移安置、应急响应启动和应急救援提供辅助决策支持。

1 基于 ABM 的暴雨洪水人口风险动态评估模型

暴雨洪涝主要致灾因素包括降雨量、频率、流速、淹没时间、淹没深度等^[1]。孕灾环境主要与高程、地形地貌、河流湖泊、土地利用、植被覆盖等的相关性比较大。承灾体主要分为人口、建筑物和农作物等^[19]; 由于本文重点研究暴雨人口风险, 考虑到在暴雨发生过程中, 人口分为处于无建筑物空旷区域和有建筑物的区域两类, 故本文的承灾体主要包括人口和建筑物两大类。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, 设计暴雨洪涝致灾因子、孕灾环境、承灾体和风险分析等智能体及其联盟, 并构建暴雨洪涝灾害多智能体系统。在此基础上, 研究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, 并在宏观上实现

对暴雨洪涝灾害复杂系统的建模。最后, 在模拟平台上动态评估暴雨洪涝灾害孕育发生发展过程的人口动态风险。图 1 所示为基于 ABM 的暴雨洪涝人口风险动态评估模型。

2 暴雨洪涝人口风险动态评估多智能体模型构建

如图 1 所示, 暴雨洪涝人口风险动态评估模型中, 不同的智能体模型以及作用规则是暴雨洪涝人口风险动态评估的核心。下文重点讨论以上问题。

2.1 孕灾环境智能体模型与作用规则

图 1 中不同孕灾环境 Agent 差异主要体现在名称、意图逻辑、推理方法、动作目标和通信内容等方面。孕灾环境 Agent 均采用反应型, 这里以高程 Agent 为例说明孕灾环境模型。本文将高程 Agent 模型定义为六元组, 即 $A = \{ \text{Elevation}, \text{WS}, \text{Rule}, \text{Action}, \text{State}, \text{Comm} \}$ 。Elevation 为 Agent 名称, WS 为外部世界状况, 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 通信方式。数字高程 (Digital Elevation Model, DEM) 不仅能够描述流域的地形、地貌、还可自动提取坡度、坡向等地貌参数, 是进行水文分析的主要数据^[20]。本文选择空间分辨率为 30 m 的 DEM 数据作为孕灾环境的数据源。高程 Agent 通过 DEM 数据可获得某一区域内每个网格内的高程以及在水文分析中所需要的排水宽带、坡度、下垫面面积等数据^[20]。

2.2 暴雨致灾因子智能体模型与作用规则

包括降雨量、流速等在内的暴雨洪涝灾害致灾因子 Agent 都采用慎思型。这里以降雨量 Agent 为例说明暴雨致灾因子模型。本文将降雨量 Agent 模型定义为六元组, 即 $A = \{ \text{Rainfall}, \text{WS}, \text{Rule}, \text{Action}, \text{State}, \text{Comm} \}$ 。Rainfall 为 Agent 名称, WS 表

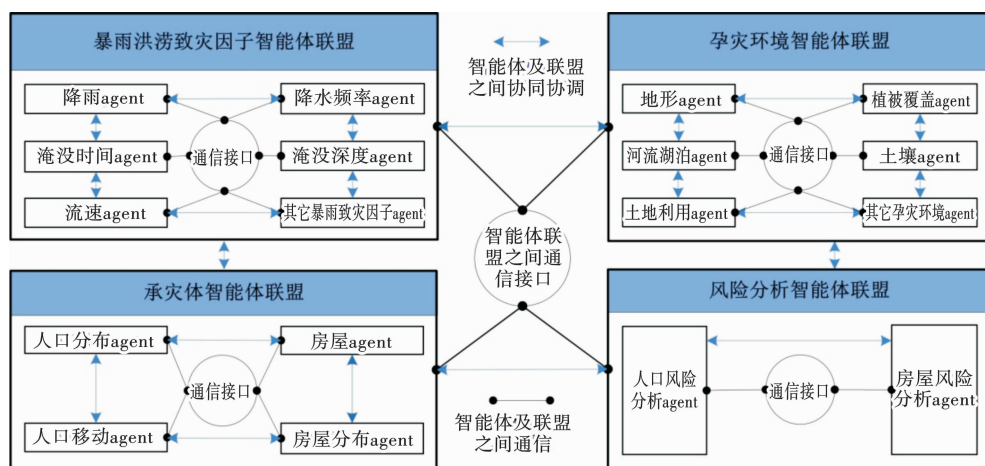


图 1 基于多智能体的暴雨洪涝人口风险动态评估模型

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 通信方式。

在完成暴雨型洪涝灾害致灾因子 Agent 内部模型设计后, 更重要是研究暴雨致灾因子 Agent 的作用规则。暴雨管理模型 (Storm Water Managment Model, SWMM) 被广泛应用在暴雨模拟中^[21-27]。本文利用 SWMM 中的降雨、地表蒸发、渗透等研究成果作为暴雨致灾因子 Agent 的相互作用规则。

2.2.1 地表降雨 Agent 和水量 Agent 作用规则

我国典型的暴雨降水过程可利用以下公式模拟^[21]:

$$q = \frac{167A_1 \times (1 + ClgP)}{(T + b)^c} \quad (1)$$

式中: q 为平均暴雨强度; 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。

对于某一区域给定重现周期下暴雨强度公式中的 $167A_1(1 + ClgP)$ 为常数, 设为 a 。则式(1)简化为 Horner 降雨强度:

$$i_{ave} = \frac{a}{(T + b)^c} \quad (2)$$

式中: i_{ave} 为平均暴雨强度。 i_{ave} 也可以通过以下公式计算^[21]:

$$i_{ave} = \frac{1}{T} \int_0^T i(t) dt \quad (3)$$

式中: $i(t)$ 为降雨强度随时间变化曲线, 联合式(2)和(3)得到:

$$\begin{cases} \frac{a}{(T + b)^c} = \frac{1}{T} \int_0^T i(t) dt; \\ i(t) = \frac{d}{dt} \left[\frac{T \times a}{(T + b)^c} \right] = \frac{a[(1 - c)T + b]}{(T + b)^{1+c}} \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中引入雨峰系数 $r(0 < r < 1)$ ^[27], 将 T 划分为峰前和峰后, 则暴雨降雨强度 $i(t)$ 转换为:

$$i(t) = \begin{cases} \frac{a \times \left[(1 - c) \times \left(\frac{T \cdot r - t}{r} + b \right) \right]}{\left(\frac{T \cdot r - t}{r} + b \right)^{1+c}} & 0 \leq t \leq T \cdot r; \\ \frac{a \times \left[(1 - c) \times \left(\frac{t - T \cdot r}{1 - r} + b \right) \right]}{\left(\frac{t - T \cdot r}{1 - r} + b \right)^{1+c}} & T \cdot r < t \leq T \end{cases} \quad (5)$$

在暴雨过程中, 当降水 Agent 根据式(5)产生后, 降水 Agent 将转化为雨水 Agent。雨水 Agent 中的雨量会有一部分用于地表填洼、蒸发和渗透等损失。雨水 Agent 的渗透损失通过霍顿模型获得; 而填洼、植被截留等损失 (S_s) 通过网格所在的地表类型获得^[27]。雨水 Agent 的渗透率计算公式为:

$$f = f_c + f_0 \times e^{-kt} \quad (6)$$

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 $0.417 \sim 1.333$ (mm/min), f_c 取值为 $0 \sim 0.167$ (mm/min), 渗透衰减系数 k 取值为

$0.033 \sim 0.117$ ^[22]。

设每个雨水 Agent 的初始体积为 V_A ; 扣除地表渗透后, 雨水 Agent 的有效体积为 V_{Aeff} 。则每个高程 Agent 网格上的所有雨水 Agent 形成的有效水量 V 通过以下公式获得:

$$V = \sum_{i=1}^n V_{Aeff_i} = \sum_{i=1}^n (1 - f) \times V_A \quad (7)$$

式中: V_{Aeff_i} 为第 i 个雨水 Agent 的有效体积; n 为高程 Agent 网格上所有雨水 Agent 的数量。

2.2.2 水深 Agent 作用规则

在暴雨过程中, 每个高程 Agent 网格上的有效水深 H_{eff} 首先由该网格的累积雨水 Agent 的有效体积决定, 同时受地表填洼、植被截留等损失 S_s 影响。在暴雨地表径流形成过程中, 每个网格上的有效水深 H_{eff} 、总降水量 P 与地表填洼和植被截留等的损失 S_s 必须满足水量平衡公式^[27], 即:

$$H_{eff} = P - S_s = \frac{V}{L} - S_s \quad (8)$$

式中: P 为高程 Agent 每个网格上某时刻内所有雨水 Agent 所形成的累积降雨量, 通过式(7) 获得; L 为高程网格宽度; S_s 为地表径流初期填洼和植被截留的损失, 根据经验公式或经验值取值为 $1.5 \sim 5$ mm^[27]。 H_{eff} 为地表网格某时刻的降水形成的有效降水深度。

通过式(8) 求得暴雨过程中每个高程 Agent 网格降水所带来的有效水深 H_{eff} 。当该网格高程 D 与有效水深 H_{eff} 之和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。本文采用 D8 多向流法确定暴雨过程中具体流向。当降雨在地表形成地表径流时, 暴雨形成洪水的实际深度 H 由该网格上有效降水水深 H_{eff} 与从该网格流向低处网格所损失的水深 H_{loss} 和从高处网格流入该网格水量所增加的水深 H_{add} 共同决定。虽然在暴雨过程, 以上三个因素都是随时间动态变化的, 但总体上必须满足水量平衡公式^[27], 即:

$$H = H_{eff} + H_{add} - H_{loss} \quad (9)$$

式中: H_{add} 和 H_{loss} 通过非线性水库模型和曼宁方程求解获得。设 t 时刻第 k 个网格上共有 x 个雨水 Agent, 有 y 个雨水 Agent 需要流出 (流入) 该网格。则该网格流出 (流入) 的雨水总量为 Q_{out} , 其计算公式为:

$$Q_{out} = \frac{dV_{out}}{dt} = \frac{d(\sum_{j=1}^y V_{eff_j})}{dt} \quad (10)$$

式中: V_{eff_j} 为第 k 个网格上移动离开的第 j 个雨水 Agent 的有效体积; $y(y \leq x)$ 为第 k 个网格上移动离开雨水 Agent 的总数。

同时, 根据非线性水库模型, t 时刻该网格上流出的水量可通过曼宁方程求解, 即:

$$Q_{out} = L \times \frac{1.49}{N} \times (P - S_s)^{5/3} \times S^{1/2} \quad (11)$$

式中: L 为网格 Agent 宽度; N 为曼宁系数, 不透水区 N 为 $0.01 \sim 0.033$, 透水区为 $0.1 \sim 0.8$ ^[22]; S_s 为网格上的损失深度; S 为地形 Agent 之间的坡度, 通过不同区域的高程 Agent 的高程差值 (DEM) 获得。

对于降雨过程的雨水 Agent 移动来说, 根据水量平衡原理, 当第 y 个雨水 Agent 从第 k 个网格移动离开时, 必然有若干个网格接受该来自第 k 个网格上的第 y 个雨水 Agent。通过联立求解方程 (8)、(10) 和 (11), 可获得第 k 个网格上 t 时刻流出水量 V_{out} 和流入水量 V_{in} 的雨水 Agent 总量。当获得 t 时刻流入和流出的雨水 Agent 总体积后, 即可获得 t 时刻第 k 网格上损失的水深 H_{loss} 和增加的水深 H_{add} 。通过式 (9) 可以获得 t 时刻暴雨在第 k 个网格上形成洪水的实际深度 H 。

2.2.3 雨水 Agent 的移动规则

雨水 Agent 移动规则为: 在 t 时刻, 每个网格上雨水 Agent 首先根据式 (8) 获得该时刻降雨量有效水深 H_{eff} 和其所在网格上的高程值 D ; 雨水 Agent 计算其所在网格上高程值 D 与 t 时刻有效降水深度 H_{eff} 之和 H_{total} ; 每个雨水 Agent 将获得 H_{total} 值与周边的 8 个网格上 H_{total} 值进行比较。当其所在网格上 H_{total} 值大于其他网格的 H_{total} 值, 该网格上的雨水 Agent 选择向 H_{total} 值小的网格上移动; 当其所在网格上 H_{total} 值小于等于其他网格的 H_{total} 值, 则该网格上雨水 Agent 保持不动; 需要注意的是, 当雨水 Agent 移动到整个地域边界时, 视为雨水 Agent 流出研究区域。

2.2.4 流速 Agent 作用规则

在完成降雨 Agent 和水深 Agent 作用规则后, 通过水深 Agent 获得流速 Agent 的作用规则。流速 Agent 作用规则, 参考洪水运行模型获得^[28], 其计算公式为:

$$V = \frac{1}{N} \times H^{\frac{2}{3}} \times S^{\frac{1}{2}}. \quad (12)$$

式中: V 为流速; H 为洪水深度; S 为地形坡度通过高程 Agent 获得; N 为曼宁系数。

2.2.5 淹没时间 Agent 作用规则

对于高程 Agent 上每个网格, 当该网格上的洪水深度 H 大于 0, 认为该网格被洪涝淹没。则第 l 个网格上的淹没时间 Agent 的作用为:

$$\begin{cases} T_l = \sum t_i; \\ H_l \geq 0. \end{cases} \quad (13)$$

式中: T_l 为第 l 个网格淹没时间; t_i 为该网格在降雨过程某时刻淹没时间; H_l 为第 l 个网格某一个时间的洪水深度。

2.3 承灾体智能体及其联盟模型构建

本文的人口承灾体是执行具体任务的主体, 也会采取一定策略进行避险, 要求其具有更强的逻辑推理和学习能力, 故采用慎思型内部结构。本文将人口 Agent 模型定义为七元组, 即 $A = \{\text{Population}, \text{WS}, \text{DB}, \text{Rule}, \text{Action}, \text{State}, \text{Comm}\}$ 。Popu-

lation 为 Agent 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 为人员 Agent 具体动作, State 为人员状态, Comm 为人口 Agent 通信方式。在完成承灾体 Agent 模型设计后, 承灾体作用规则是进行风险动态评估的核心之一。

2.3.1 人口 Agent 与房屋 Agent 生产与受灾状态判

对于人口与房屋, 按照“高程越高, 人员和房屋分布越少”的规则进行; 同时根据区域的人口分布密度和房屋分布状态来分别生产人员 Agent 和房屋 Agent 数据。

承灾体受灾状态判断规则主要根据水深 H 值和淹没时间 T 值来判断人员 Agent 和房屋 Agent 的受灾状态, 具体参考^[28]。本文将人口和房屋受灾状态划分为安全、轻度风险、中度风险和重度风险。

2.3.2 人口 Agent 移动规则

在暴雨过程中, 人员 Agent 移动受到建筑物和安全高地等避险场所影响。本文主要将安全高地和房屋作为避险设施来考虑。人口 Agent 移动按照“向最安全的区域移动”的原则进行。具体规则如下:

(1) 人员 Agent 判断自身状态是当安全时, 则保持不动;

(2) 当人员 Agent 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 Agent 处于中度危险时, 首选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安全的房屋, 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 Agent 处于重度危险时, 首选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安全的房屋, 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。

2.4 人口风险分析智能体模型及作用规则

风险分析 Agent 是执行具体任务的主体, 也采用慎思型内部结构。这里以人口风险分析 Agent 为例说明单个风险分析智能体的模型与作用规则。本文将人口风险分析 Agent 模型定义为七元组, 即 $A = \{\text{PopuRiskAnalyze}, \text{WS}, \text{DB}, \text{Rule}, \text{Action}, \text{State}, \text{Comm}\}$ 。PopuRiskAnalyze 为 Agent 名称, WS 表示外部世界状况, DB 为数据库, Rule 为来用户定义统计规则, Action 为统计不同人口状态的动作, State 为人口风险分析 Agent 动作完成的状态, Comm 为人口风险分析 Agent 的通信方式。

人口风险分析 Agent 的作用规则为: 对于暴雨过程中任意时刻 t , 分别统计安全状态人口 Agent、

轻度风险状态人口 Agent、中度风险状态人口 Agent 和重度风险状态人口 Agent 的数量, 并绘制曲线; 统计轻度、中度和重度三种风险状态人口 Agent 的总数量, 并绘制曲线。

2.5 智能体之间协调协作及通信机制设计

本文利用 KQML (Knowledge Query and Manipulation Language) 作为 Agent 之间的通信语言。所有 Agent 均通过 KQML 进行通信交互协调。通过 Agent 之间的通信可实现智能体的协调协作, 评估不同情境下的暴雨洪水风险。例如: 在整个过程中, 人口 Agent 和它所在相同的高程 Agent 上的 waters 和 geoclass 询问 waters 的淹没时间 T 和 geoclass 的水深 H , waters 实时把自身的淹没时间 T 告知向它询问的人口 Agent, geoclass 实时把水深 H 告知向它询问的人口 Agent, 接着人口 Agent 可以根据水深 H 和淹没时间 T 进行自身受灾状态的更新, 等等。

3 基于 Netlogo 平台的暴雨洪涝人口风险动态评估

利用本文构建的模型, 在 Netlogo 平台上, 对淮河流域上游地区鲁山县的暴雨洪涝灾害人口风险动态变化进行评估。鲁山县位于河南省中西部, 伏牛山东麓, 南临南阳、东接平顶山, 地处北亚热带与暖温带的过渡带, 年平均气温 14.8° , 年均降水量 $1\,000\text{ mm}$ 。鲁山县县域面积 $2\,432.32\text{ km}^2$, 总人口 92.7 万人, 平均人口密度约为 381 人/km^2 。

3.1 暴雨全过程的人员风险动态模拟

利用前文所提及的暴雨模型, 对研究区域的暴雨致灾因子进行模拟。根据 SWMM 模型的暴雨强度公式, 式(5)中的雨峰系数 r 取值为 0.5 , 将降雨过程分为峰前和峰后各 12 h , 并在降雨结束后继续运行 14.4 h 。整个降雨过程的曲线见图 2, 从图 2(a) 可知, 整个模拟过程中前 12 h 的雨水 Agent 的数量从 $4\,000$ 个逐步增加到峰值, 从 12 h 后开始逐步降低; 对应的瞬时降雨量 (图 2(b)) 从 0.125 mm 逐步提升到峰值 0.225 mm 左右, 然后逐步降低; 累积降雨量呈现逐步增加趋势, 从图 2(c) 可知在 24 h 的时间累积降雨量达到 80 mm , 其

中累积降雨达到 50 mm 的时间为 14 h 。

从分辨率为 30 m 的 DEM 数据 (<http://earth-explorer.usgs.gov/>) 中选择鲁山县的 441 km^2 为实验区域, 区域的最大高程为 $1\,155\text{ m}$, 最低高程为 120 m , 如图 3(a) 所示。按照“较低高程地区人口较多, 较高高程地区人口数较少”的规则, 考虑到目前鲁山县为劳务输出地区, 人口密度按照 198 人/km^2 核算, 设每个人员 Agent 代表实际中的 10 人, 则在研究区域随机生成 $8\,746$ 个人员 Agent 并分布在 $49\,000$ 高程 Agent 上; 同时随机生成超过 $4\,000$ 个房屋 Agent, 如图 3(b) 所示。

在完成初始化后, 利用所构建模型对实验区暴雨洪涝全过程的人员风险进行动态模拟。在前 8 h , 降雨 Agent 逐步增加但没有达到峰值。该阶段降雨 Agent 数量虽然逐步增加, 在地表填洼和渗透等损失的影响下, 开始形成地表径流但不明显。由于房屋 Agent 具有一定避险作用, 再加上人口 Agent 会采用一定“避险”移动策略, 在该阶段暴雨对人员 Agent 的影响有限, 但也出现了少量的处于轻度受灾状态的房屋 Agent 和人员 Agent, 其中 2.4 h 的状态如图 3(c) 所示。在 $8\sim 16\text{ h}$, 降雨 Agent 逐步增加并达到峰值然后逐步减少。该阶段在高程较低的区域开始形成洪水并向周边地区流动; 且随着降雨过程的发展, 所形成洪水的区域、深度和流速会逐步增加。虽然房屋 Agent 具有避险作用, 而且人员 Agent 仍然会采用智能的避险移动策略, 但洪水对承灾体 Agent 的影响明显增强。该阶段处于轻度受灾状态、中度受灾状态和重度受灾状态的房屋 Agent 和人口 Agent 的数量呈现增加趋势, 降雨 12 h 对应的模拟结果如图 3(d) 所示。在 $16\sim 24\text{ h}$, 降雨 Agent 逐步减少直至降雨停止。虽然该阶段降雨 Agent 逐步减少, 但降雨形成的洪水对房屋 Agent 和人口 Agent 造成的危险仍然存在, 该阶段处于三种受灾状态的人员在进行复杂的相互转化, 降雨 24 h 对应的模拟结果如图 3(e)。在 $24\sim 38.4\text{ h}$, 该阶段虽然降雨停止, 降雨形成的洪水逐步转化为涝灾, 虽然地表径流呈现减弱趋势, 但仍然具有较大的人员 Agent 处于不同的受灾状态, 其中 38.4 h 对应的模拟结果如图 3(f) 所示。

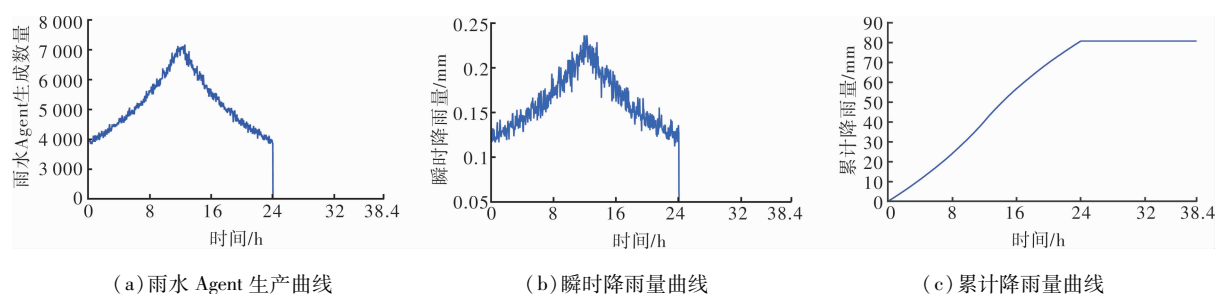


图2 暴雨全过程的降雨量模拟

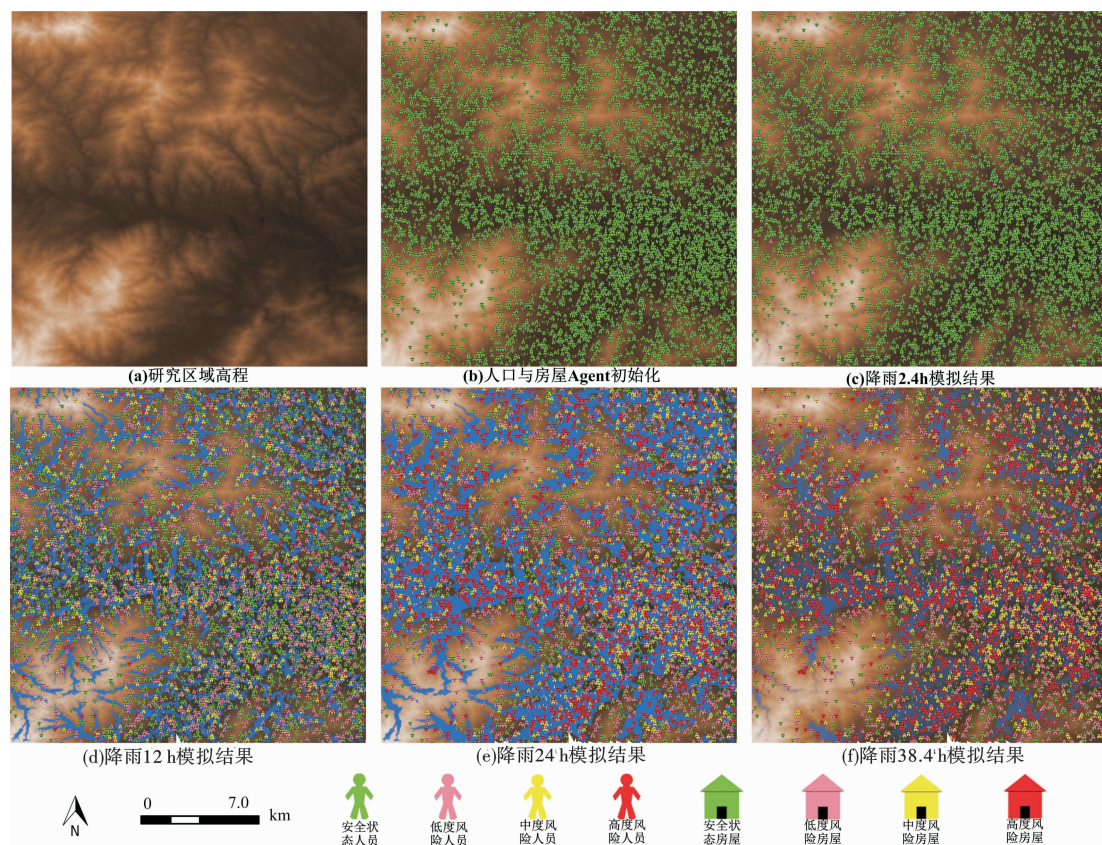


图3 暴雨全过程人口风险动态模拟

3.2 暴雨全过程人口风险动态评估及分析

通过前文分析可知,人口风险随着暴雨洪涝的孕育发生发展呈现复杂的变化。人口风险分析 Agent 对暴雨全过程中的安全、轻度受灾、中度受灾和重度受灾四种状态人口 Agent 进行实时记录。图4所示为暴雨全过程不同状态的人口的动态变化曲线。

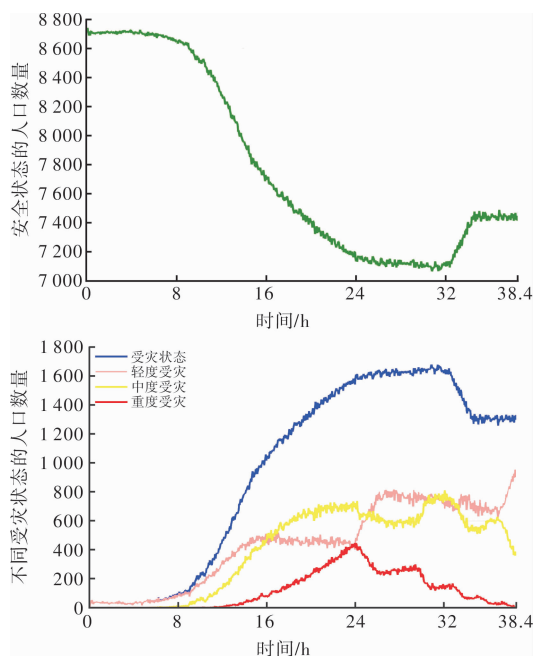


图4 暴雨全过程不同状态人口动态变化曲线

从图4可知,处于安全状态的人口在前8h内,呈现逐步降低趋势;在8~24h内,呈现逐步降低趋势,但降低速度明显高于前8h;在24~32h内,呈现逐步降低趋势,但降低速度低于8~24h;在32~34h后呈现增长趋势,34h以后处于安全状态的人口基本保持不变。

从图4可知,受灾状态人口变化趋势与安全状态人口变化趋势相反。对于轻度受灾人口,前8h呈现增长趋势;在8~16h之间仍然呈现增长趋势,但增长速度高于前8h;在16~24h之间呈现波动趋势;在24h后呈现先增加后平稳再增加趋势。对于中度受灾人口,前8h没有出现该类状态,在8至16h之间呈现逐步增长趋势,但增长速度小于轻度受灾状态人口;在16~24h之间,仍然呈现增长趋势,并且数量超过轻度受灾人口;在24h后,呈现先降低,再增加,再降低,再小幅增加,最后下降的复杂变化趋势。对于重度受灾人口,从8~24h能呈现增长趋势,并在24h达到峰值;在24h后,重度受灾人口呈现波动式下降趋势。从图4和上文分析可知,在暴雨全过程中,不同状态的人口变化比较复杂。表1为每3h不同状态人口定量统计结果。

从表1中可知,暴雨期间前6h内,因为致灾因子影响较为微弱,只有少量人口(总人口的0.5%)处于受灾状态,且均为轻度受灾。在第9h,人口受灾影响加大,处于轻度受灾状态的人口

增至 0.9%，且出现少量中度受灾人口（总人口的 0.3%），而此时处于重度受灾的人口所占比例为零，总体受灾人口比例增长至 1.2%。从第 12~24 h，暴雨洪涝带来的人口灾情加重，第 12 h 已经出现少量人口（总人口的 0.1%）处于重度受灾状态，且在第 24 h 人数增长至总人数的 5.1%，处于三种受灾状态的人口比例均出现了不同幅度的增长，总体受灾人口比例在第 24 h 增长至 18.4%。第 27 h 和 30 h 的数据表明降雨停止后人口的安全状况仍继续受到影响，总体受灾人口比例相对稳定，但灾情的减轻促使人口受灾危险程度减弱，处于重度受灾的人口比例由第 24 h 的 5.1% 减少至第 30 h 的 2.6%，而处于中度受灾的人口比例出现波动，处于轻度受灾的人口比例由第 24 h 的 5.5% 增加至第 30 h 的 8.6%；第 33 h 和 36 h 的数据表明灾情进一步减轻，处于重灾的人口比例在第 36 h 减小至 0.5%，总体受灾人口比例下降至 15.0%，尽管重灾人口比例下降可以使得轻度和中度受灾人口比例上升，但处于轻度和中度受灾的人口比例整体趋势仍保持下降态势。

表 1 不同时间下不同状态的人口统计表

时间	安全	受灾	轻度	中度	重度
3 h	人数	8 702	44	44	0
	比例/%	99.5	0.5	0.5	0
6 h	人数	8 702	44	42	2
	比例/%	99.5	0.5	0.5	0
9 h	人数	8 639	107	77	30
	比例/%	98.8	1.2	0.9	0.3
12 h	人数	8 273	473	331	135
	比例/%	94.6	5.4	3.8	1.5
15 h	人数	7 806	940	482	396
	比例/%	89.3	10.8	5.5	4.5
18 h	人数	7 511	1 235	496	577
	比例/%	85.9	14.1	5.7	6.6
21 h	人数	7 342	1 404	451	667
	比例/%	84.0	16.1	5.2	7.6
24 h	人数	7 134	1 612	484	681
	比例/%	81.6	18.4	5.5	7.8
27 h	人数	7 151	1 595	771	588
	比例/%	81.8	18.2	8.8	6.7
30 h	人数	7 117	1 629	751	647
	比例/%	81.4	18.6	8.6	7.4
33 h	人数	7 221	1 525	675	725
	比例/%	82.6	17.4	7.7	8.3
36 h	人数	7 432	1 314	673	602
	比例/%	85.0	15.0	7.7	6.9

4 结论与展望

面向灾害管理实际工作对洪涝人口风险进行动态评估的需求，本文利用 ABM 方法构建暴雨洪涝人口风险动态评估模型，对暴雨洪涝孕育发生发展全过程中的人口风险进行动态定量评估。

(1) 构建了基于 ABM 的暴雨洪涝人口风险动态评估模型，对模型中所涉及的孕灾环境、暴雨致灾因子、承灾体和风险分析等 Agent 模型及 Agent 通信的进行分析研究。

(2) 利用暴雨管理模型 (SWMM)、霍顿模型、水量平衡模型、非线性水库模型和曼宁方程等重点对暴雨致灾因子 Agent 的作用规则进行研究；并在 Netlogo 平台上，对淮河上游鲁山地区的暴雨洪涝人口风险进行动态评估。结果表明本文所构建的模型对暴雨型洪涝灾害孕育发生发展过程中的安全、低风险、中风险和高风险四种状态的人员动态变化进行分析。本文的研究结果对暴雨洪涝灾害人口灾情预测、应急救助和应急管理都具有较强的指导意义。

(3) 本文构建的模型虽然能对暴雨洪涝不同受灾状态的人口风险能进行动态评估，但需要进一步完善。首先，本文中不同 Agent 的作用规则需要进一步完善；其次，需要利用真实的暴雨洪涝人口灾情数据验证和完善本文所构建的模型；最后，研究除暴雨型以外的洪涝灾害（如冰雪融水型洪涝和溃坝型洪涝等）的人口风险动态评估模型与方法。这些都是我们后续的研究重点。

参考文献：

- [1] 蒋卫国, 李京, 陈云浩, 等. 区域洪水灾害风险评估体系 (I) - 原理与方法 [J]. 自然灾害学报, 2008, 17(6): 105 - 109.
- [2] 国家防汛抗旱总指挥部, 中华人民共和国水利部. 2012 年中国水旱灾害公告 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2013.
- [3] Buchele B, Kreibich H, Kron A, et al. Flood risk mapping: contributions towards an enhanced assessment of extreme events and associated risks [J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2006, 6(4): 485 - 503.
- [4] Apel H, Thielen A H, Merz B, et al. A probabilistic modelling system for assessing flood risks [J]. Natural hazards, 2006, 38 (1/2): 79 - 100.
- [5] 丁雨淋, 杜志强, 朱庆, 等. 洪水淹没分析中的自适应逐点水位修正算法 [J]. 测绘学报, 2013, 42(4): 546 - 553.
- [6] 谢俊举, 李亚琦. 基于洪水演进数值模拟的溃坝危害性快速评估 [J]. 灾害学, 2011, 26(2): 31 - 34.
- [7] Bates P D, De Roo A P J. A simple raster-based model for flood inundation simulation [J]. Journal of hydrology, 2000, 236(1): 54 - 77.
- [8] Ding Y, Zhu Q, Lin H. An integrated virtual geographic environ-

- mental simulation framework: a case study of flood disaster simulation [J]. *Geo-spatial Information Science*, 2014, 17(4): 190–200.
- [9] 吴钢峰, 贺治国, 刘国华. 具有守恒特性的二维溃坝洪水演进数值模型[J]. *水科学进展*, 2013, 24(5): 683–691.
- [10] Pelletier J D, Mayer L, Pearthree P A, et al. An integrated approach to flood hazard assessment on alluvial fans using numerical modeling, field mapping, and remote sensing [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2005, 117(9/10): 1167–1180.
- [11] Meyer V, Scheuer S, Haase D. A multicriteria approach for flood risk mapping exemplified at the Mulde river, Germany [J]. *Natural Hazards*, 2009, 48(1): 17–39.
- [12] Ding Y, Fan Y, Du Z, et al. An integrated geospatial information service system for disaster management in China [J]. *International Journal of Digital Earth*, 2014 (ahead-of-print): 1–28.
- [13] 莫建飞, 陆甲, 李艳兰, 等. 基于 GIS 的广西农业暴雨洪涝灾害风险评估[J]. *灾害学*, 2012, 27(1): 38–43.
- [14] 孔凡明, 蒋卫国, 李京, 等. 基于 MODIS 的 2011 年泰国洪涝受灾信息提取与分析[J]. *灾害学*, 2013, 28(2): 95–99.
- [15] 史培军. 四论灾害的理论与实践[J]. *自然灾害学报*, 2005, 14(6): 1–7.
- [16] 王飞, 尹占娥, 温家洪, 等. 基于多智能体的自然灾害风险动态评估模型[J]. *地理与地理信息科学*, 2009, 25(2): 85–88.
- [17] Dawson R J, Peppe R, Wang M. An agent-based model for risk-based flood incident management [J]. *Natural Hazards*, 2011, 59(1): 167–189.
- [18] Linghu B, Chen F, Guo X, et al. A Conceptual Model for Flood Disaster Risk Assessment Based on Agent-Based Modeling[C]// *Computer Sciences and Applications (CSA)*, 2013 International Conference on. IEEE, 2013: 369–373.
- [19] 史培军. 再论灾害的理论与实践[J]. *自然灾害学报*, 1996, 5(4): 6–17.
- [20] 史蕊. 基于 GIS 和 SWMM 的城市洪水模拟与分析[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2010.
- [21] 张大伟, 赵冬泉, 陈吉宁, 等. 芝加哥降水过程线模型在排水系统模拟中的应用[J]. *给水排水*, 2008, 34(Sup. 1): 354–357.
- [22] 赵冬泉, 王浩正, 陈吉宁, 等. 城市暴雨径流模拟的参数不确定性研究[J]. *水科学进展*, 2009, 20(1): 45–51.
- [23] Ouyang W, Guo B, Hao F, et al. Modeling urban storm rainfall runoff from diverse underlying surfaces and application for control design in Beijing [J]. *Journal of environmental management*, 2012, 113: 467–473.
- [24] 张倩, 苏保林, 袁军营. 城市居民小区 SWMM 降雨径流过程模拟[J]. *北京师范大学学报: 自然科学版*, 2012, 48(3): 276–281.
- [25] Wu J Y, Thompson J R, Kolka R K, et al. Using the Storm Water Management Model to predict urban headwater stream hydrological response to climate and land cover change [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2013, 17(12): 4743.
- [26] Sun N, Hall M, Hong B, et al. Impact of SWMM catchment discretization; case study in Syracuse, New York [J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2012, 19(1): 223–234.
- [27] 任伯帜. 城市设计暴雨及雨水径流计算模型研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2004.
- [28] 李京, 陈云浩, 唐宏, 等. 自然灾害灾情评估模型与方法体系[M]. 北京: 科学出版社, 2012.

The Dynamic Population Risk Assessment Model for Rainstorm-flood Utilization Multi-agent

Li Wenbo¹, Guo Xiaotian^{1,2}, Mao Xuemin³, Xiao Dan⁴, Lai Wenzhe^{1,2} and Wang Hailei²

(1. *Institute of Intelligent Machines, Chinese Academy of Sciences, Hefei 23003, China;*

2. *Department of Automation, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;*

3. *School of Management, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;* 4. *Guizhou Key Lab. of Economics System Simulation, Guizhou University of Finance and Economics, Guiyang 550025, China)*

Abstract: The disaster management practical work needs the dynamic results of population risk during the whole rainstorm process. The Agent-based Modeling (ABM), which is one method for complex system modeling, had been employed to build population risk dynamic assessment model for rainstorm-flood. The built model had been used to dynamically assess the population risk for the whole rainstorm process. The internal models, the mechanism, the rules, and the communication of different agents, including hazard factor agents, hazard environments agents, hazard effect objects agents, and risk analyze agents, had been focused. On Netlogo platform, the constructed models had been used to assess the population risk dynamic changes of Lushan County which locates in the upstream of the Huaihe River Basin. The results show that the constructed models in this paper can effectively solve the dynamic changes of the population risk during the whole process of rainstorm-flood disaster. The results of this study can provide one new approach for flood disasters risk dynamic assessment.

Key words: rainstorm; flood disaster; population; risk; dynamic assessment; multi agent; model