Research on Urban Water Logging Emergency Rescue Based on Military Chess Deduction

Shuo Zhang, Peng Chen, Jianhua Bao, Hongyang Zhao

College of Tourism and Geographical Science, Jilin Normal University, Siping 136000, China

基于兵棋推演的城市内涝灾害应急救援研究

张硕, 陈鹏, 鲍建华, 赵洪阳

吉林师范大学旅游与地理科学学院, 四平 136000, 中国

Abstract

At present, the social waterlogging disasters are frequent and there are many uncertain factors in the analysis of waterlogging. In this study, we use dynamic Bayesian model to analyze the probability of uncertain disasters, and achieve the wargame technology of waterlogging disasters in Harbin Daoli District. The experimental results show that Bayesian network is feasible for analyzing the total probability of waterlogging disaster under wargame technology model. It is great significance for further research the effects of uncertain disasters.

Keywords: urban waterlogging; wargame; Dynamic Bayesian

摘要

当前社会内涝灾害频发, 给居民生命安全及城市基础设施造成巨大损失。兵棋推演模拟城市内涝灾害救援过程, 可对未发生灾害风险进行预判, 最大限度降低灾害风险造成的损失。

以哈尔滨道里区为例, 以内涝灾害应急救援为研究对象, 利用动态贝叶斯模型及兵棋推演理论, 实现了内涝灾害应急救援过程兵棋推演。结果表明: 基于贝叶斯网络与兵棋推演模型支持下的内涝灾害应急救援全概率进行分析是可行的。对进一步研究不确定性灾害应急救援有一定指导意义。

关键词: 城市内涝; 兵棋推演; 动态贝叶斯

1 引言

近年来降雨强度增大, 城市排水能力差导致内涝灾害频繁发生, 给城市居民和政府带来严重的损失。在此环境下兵棋推演逐渐被运用到灾害管理抢救和事故管理系统中[1-2]。一方面, 可以通过“博弈”来争取“最适”利益, 同时可节约成本、节约时间, 主要用于谈判和有竞争、有对抗性的事务[3-4]; 美国联邦紧急事务管理署(FEMA)针对灾害危机管理的重要发展项目, 将兵棋推演引入到经济事务管理中[5]; 台湾环境与灾害政策学会参考美国 FEMA 的经验, 发展适合台湾情景的兵棋推演体系。在城市内涝灾害居民应急避难方面, 已有的研究

集中在城市内涝应急管理中,建立了以时间为标准的评价体系与推演规则,实现了城市内涝灾害应急管理的兵棋推演模型[6]。但就当前研究现状内涝灾害的不确定性以及推演模型的局限使得研究结果不能再实际应用中广泛适用。因此本文就不确定性灾害因素基于兵棋推演模型运用贝叶斯网络进行不确定分析,运用博弈论、概率论、统计学等科学方法,通过对各类灾害数值模拟和人员行为数值模拟,仿真灾害发生、发展的过程,以及人们在危机环境中可能做出的各种反应[7-8];并开展应急演练[9-10],在低成本的情况下评估和发现预订方案的漏洞,演练和支援决策与指挥人员,提高城市灾害应急管理水平[11-12]。

2 研究区概况

哈尔滨市道里区位于北纬 $45^{\circ}32'47''$ 、东经 $126^{\circ}08'38''$ (图 1),道里区属松嫩平原的一部分,呈南高北低的地势,自然形成了松花江两岸的泛滥土区。多年平均降水量 545.7mm ,

流域上多年降水量为 525mm 。流域内持续时间长、雨量较大、影响范围广的大暴雨发生时间多集中在 7、8 两个月份,此期间极易形成暴雨内涝灾害。

3 数据来源与方法

3.1 数据来源

本研究所需数据中气象资料来自黑龙江省哈尔滨市气象局多年降雨数据(1961-2009 年),空间数据采用高分辨率快鸟影像(分辨率 0.61m),以及道里区排水管网数据。所需城市下垫面基础信息从快鸟影像数据中提取,其中包括道路信息、居民点信息、地面糙率、面积等参数,所用数据均利用 ARCGIS 软件中的空间分析工具进行分析和提取。其中降雨数据用来计算研究区不同重现期下制定回合数内降雨量;下垫面基础地理信息数据为兵棋地图绘制提供依据(图 2)。

图 1 研究区位置

图2 研究区兵棋推演内涝点分布图

3.2 研究方法

兵棋三要素分别为棋子，棋盘，想定，具体设定如下。

3.2.1 兵棋棋子设定

在兵棋中每一个棋子都表示一定的作战单位和作战标识，本文将以敌我双方既道路积水深度和排水量为作战单位，设定我方棋子与敌方棋子。在规则设定中计算出我方棋子与敌方棋子攻击值与防御力。将棋子置于六边形网格地图中进行博弈。在本文中作战双方分别为内涝灾害（敌方），抗灾行动（我方）；即暴雨积水深度，与排水系统排水量之间的“博弈”。

3.2.2 兵棋地图绘制

兵棋棋盘是一系列带网格的特殊地图，与象棋围棋地图相似但是在真实作战状态下需要了解作战地势，河流等以及棋子一步可以移动距离。均需要在网格地图中进行标示。在实际应用中大部分采用正六边形，因为考虑到在实际中的行动方向作战距离，以及误差等正六边形为等距且方向最多的图形。

3.2.3 兵棋推演规则

兵棋规则是为规范兵棋推演和裁决交战

结果而做出的具体规定，是设计和研发兵棋的基础和前提，以哈尔滨市道里区为例，规则主要在于对敌方暴雨降雨量进行设定，规定降雨强度，以十分钟为一个回合，假设第十八个回合清除积水，对每个回合积水量进行求解。对我方排水力量进行设定，回合制进行推演[13]。

(1) 棋子移动规则

参照 Talonsoft 公司的《战争艺术 3》手册，并结合研究区实际情况，设定一个六角网格代表 150m 距离，按照实际数据计算，棋子移动一个网格，代表移动了 150m，按照车辆行驶速度与到达目的地的距离，便可计算出每回合最多可以走多远，便可得到应急排水车的裁决过程，即应急排水车的机动格数为 18。

(2) 排除积水

规则：抽取积水是最有效解决道路积水的方法，能否及时有效的排除路积水成为衡量救援城市内涝的重要标准。排水系统包括泵站和临时泵站（研究区泵站排水量 5.5m³/s），调配移动泵车、抢险泵、发电机组等防汛设备投入抢险。通过计算出排水能力，和积水排出的时间与回合。并实时计算道路积水深度，每一回

合计算一次，直到积水排除为止。

3.2.4 想定描述

(1) 背景

近年来哈尔滨城市化进程较快，不论是新城区还是老城区都存在着排水管道偏少，管渠断面过小，市区极易形成城市积涝。哈尔滨市区每年 6-9 月都会发生 2-3 次城市内涝，发生内涝较大范围有 21 处，其中积水严重的有 4 处、较严重的有 9 处，道路最深处积水达到 1.5m 左右[14]。

(2) 敌我双方对比

敌方：设定哈尔滨市道里区有 9 个道路积水点，积水点的变化随时间变化。设定变化时间间隔为 10min。

我方行动：应急指挥中心 1 个；因只考虑排除积水，应急车辆只记录排水车辆 18 辆。

(3) 双方对战任务

敌方：由于敌方为内涝灾害，因此敌方任务仅为道路积水->积水面积扩大->积水面积缩小->积水清除四个过程。

我方：我方作战任务是依据监测结果，派出适当的排水车辆、赶赴道路积水区域，进行道路积水排除。

(4) 双方作战行动

兵棋推演过程是一个复杂的推演过程，每一步推演都是一次博弈过程，从单位算子的每一步移动到双方对战战术，都需要推演双方以博弈的观点来决定己方走棋。据此设定双方作战行动如下：

1) 敌方行动

由于敌方行动为道路积水变化过程，因此，本研究中首先计算每个时间段的降雨量，然后以对应时间段降雨量为初始参数，带入城市暴雨内涝道路积水数值模型，分别计算出不同降雨概率下道路积水变化情况[15-16]。

A 暴雨规则制定

适合我国条件的暴雨雨型为芝加哥雨型（CHM），因为它对暴雨历史的降雨都适用，只是平均强度不同。计算过程为：

①根据芝加哥雨型公式 $\bar{i} = \frac{a}{(t+b)^n}$ 可计算出 t 时间内的降雨总量：

$$H = \bar{i} \cdot t = \frac{at}{(t+b)^n} \quad (1)$$

式中， $\bar{i}$ 为历时 t 内的平均雨强，a、b、n 为常数。

②对 H 求导，得 t 时刻的瞬时雨强：

$$i_t = \frac{dH}{dt} = \frac{a[(1-n)t+b]}{(t+b)^{n+1}} \quad (2)$$

③引入降雨强度峰值 r，r 值为实际降雨事件，一般为 0.3-0.5 之间。则降雨历时为：

$$t = \frac{t_a}{r} = \frac{t_b}{1-r} \quad (3)$$

式中， t_b 为峰前降雨历时， t_a 峰后降雨历时。

④将公式 (3) 带入公式 (2) 中，可得：

$$i_b = \frac{a \left[\frac{(1-n)t_b}{r} + b \right]}{\left[\left(\frac{t_b}{r} \right) + b \right]^{n+1}} \quad (4)$$

$$i_a = \frac{a \left[\frac{(1-n)t_a}{1-r} + b \right]}{\left[\left(\frac{t_a}{1-r} \right) + b \right]^{n+1}} \quad (5)$$

⑤依据哈尔滨市暴雨强度公式：

$$q = \frac{2889(1+0.91gp)}{(t+10)^{0.88}} \quad (6)$$

式中：p 为重现期；t 为降雨历时，单位为 h；q 为暴雨强度，单位 1/(S·hm²)。

经上述模型计算结果，可知研究区道路积水现状及其随时间变化情况，以此为基础便可知敌方在 18 个回合内变化情况（表 1）。

2) 我方行动

采取每个积水点派出应急排水车 2 辆，共计 18 辆。

4 推演模型构建

4.1 贝叶斯网络模型的建立

4.1.1 定义贝叶斯网络节点变量

要创建贝叶斯网络首先必须确定网络节点。基于上述内涝灾害机理的分析，认为降雨量和排水量即为贝叶斯网络的节点或变量[17]。本文只介绍如何定义降雨及积水量变量，通常城市内涝发生是由于降雨量过大，而排水系统不充分，从而使积水量持续上升。因此，

表 1 降雨强度与回合制定

回合	P=1a	P=3a	P=5a	回合	P=1a	P=3a	P=5a
1	0.054	0.078	0.089	10	0.381	0.554	0.634
2	0.060	0.087	0.100	11	0.710	1.032	1.182
3	0.068	0.099	0.113	12	2.048	2.976	3.408
4	0.078	0.114	0.130	13	0.710	1.032	1.182
5	0.092	0.133	0.153	14	0.381	0.554	0.634
6	0.110	0.160	0.184	15	0.247	0.359	0.411
7	0.137	0.199	0.228	16	0.178	0.259	0.296
8	0.178	0.259	0.296	17	0.137	0.199	0.228
9	0.247	0.359	0.411	18	0.110	0.133	0.153

注：回合之间间隔为 10 分钟

积水量变化是内涝灾害发生的一个重要属性特征。本文将积水量分为三个等级:低(Low)、中(Medium)、高 (High)，作为积水量节点三个状态，分别对应降雨过程中积水量的不同阶段。

4. 1. 2 构建有向无环图

采用 Netica 软件创建贝叶斯网络模型，并进行概率推理。运用贝叶斯网络进行分析，需要首先构造所描述问题的网络结构。一般来说，有两种方法：一是利用专家知识手工建立；二是通过案例学习自动获得。本文基于专家知识，结合前面对内涝灾害的机理分析、采用手工方法创建了贝叶斯网络结构，如图 3 所示。

图中的信度栅为浅色，是因为没有编译 (Compile)，且没有给节点变量状态赋值。

4.2 定义节点条件概率表

定义节点条件概率表有三种方法：①利用专家 知识，直接手工输入节点条件概率表。②用公式创建条件概率表。手工输入条件概率表有时很麻烦，特别是如果有很多父节点状态要考虑时，Netica 提供了公式方法创建条件概率表。③基于案例学习获得条件概率表。在获得条件概率表的同时，也构建网络结构。本文综合使用了专家知识和编辑公式两种方法，

图 3 未编译的贝叶斯网络模型

定义后的条件概率表见图 4。图中，赋予了条件概率表且编译后，贝叶斯网络信度栅为深色。

择重现期为五年一遇暴雨灾害，求解其他节点变量的后验概率。在 Netica 中将重现期变量设置成五年 = 100% 状态，表示证据变量

图 4 编译后的城市内涝灾害的贝叶斯网络模型

网络中每个节点变量都隐含了该节点的条件概率表，图 5 是“积水深度”节点的条件概率表。表的左边是“积水深度”的 2 个父节点的状态组合，右边是“积水深度”相对于其父节点状态组合的概率分布。

4.3 贝叶斯网络概率推理

内涝灾害发生概率分析如图 3 所示，基于贝叶斯网络，假设将重现期为证据变量。若选

的已知状态，利用自动更新的功能，更新整个网络的概率，除了将重现期变为五年，再假设道路阻水系统排水力量为低，即证据节点排水系统的状态为低（low）概率设为 50%。在 Netica 中将其他变量进行调整及满足兵棋模拟中想定的双方规则，利用自动更新的功能更新整个网络的概率，结果如图 6 所示，此时内涝灾害发生概率降低。

Node: jishuishendu		Apply OK		
Chance		% Probability		
chongxianqi	zushuixitong	high	medium	low
half	high	53.866	13.246	32.888
half	medium	45.615	9.361	45.024
half	low	34.932	40.882	24.185
one	high	63.749	15.205	21.046
one	medium	18.765	49.172	32.063
one	low	30.458	31.765	37.777
two	high	42.36	8.739	48.901
two	medium	36.932	28.626	34.442
two	low	51.273	9.044	39.683
three	high	39.741	45.597	14.662
three	medium	43.088	22.293	34.62
three	low	60.194	28.851	10.955
four	high	75.121	2.808	22.071
four	medium	20.215	11.843	67.942
four	low	27.961	40.522	31.517

图6 内涝灾害清除概率

5 结论与讨论

5.1 结论

本文将兵棋推演方法引入到城市内涝灾害应急救援过程,通过构建基于动态贝叶斯网络的城市内涝灾害应急救援兵棋推演模型,体现了贝叶斯网络强大的图形化网络知识表达和有效处理不确定证据的能力,这是对内涝灾害系统研究的一种尝试。通过推演模拟发现,第十八个回合清除积水的概率为 64.2%。以及 18 个回合中各回合发生内涝的灾害的概率均

小于 50%。各个重现期排水车辆安排是否充裕也可以根据贝叶斯网络推理出来。

5.2 讨论

城市内涝灾害应急救援过程兵棋推演过程是一个复杂的过程,是由政府部门为主导,大量工作人员参与的推演过程,在本研究中仅设置了我方--应急救援车辆的数量,敌方--道路积水的情况,在推演过程中仅以处置时间为标准,并未对具体的应急救援能力进行计算与参与部门设置,因此,在推演结果中可能存在精度上的差异;研究中的城市暴雨计算、

内涝数值模拟以及兵棋地图都是以哈尔滨市道里区为例。不具有普适性,要想将兵棋推演模型在内涝灾害中广泛应用还需更多的实地调查与研究。

致谢

本研究得到了国家社会科学基金项目(41501557)的资助。

参考文献

- [1] 叶立民,龚立,刘忠.兵棋推演系统设计与建模研究.计算机与数字工程,2011,2(28):58-61.
- [2] 史朝龙,刘博.基于仿真的推演评估系统方案研究.战术导弹技术,2012,2(3):122-124.
- [3] 孔维学.美国 ADMS 灾难管理模拟系统.现代职业安全,2011,11(111):107-108.
- [4] Darken R, McDowell P, Johnson E. Projects in VR: the Delta3D open source game engine. IEEE, 2005,5(6):10-12.
- [5] Li Y L, Yao F. Confrontational CISR simulation training system based on high level architecture. Command Information System and Technology,2012,3(5):5-7.
- [6] Li J, Zheng J I.The design and implementation of "AKY-MCP" a mobile major accidents monitoring and command platform.Journal of Safety Science and Technology,2009,5(6):77-80.
- [7] 承敏钢,江水,李丽芳.基于兵棋推演理论的城市危机应急管理体系设计.中国环境管理,2014,3(6):38-42.
- [8] 李群.突发事件应急推演系统平台分析与设计.中国安全生产科学技术,2012,3(8):120-122.
- [9] 马英涛,张小平,马跃,等.应急演练万案动态推演系统.计算机系统应用,2013,2(22):64-67.
- [10] 陈鹏,张继权,严登华,等.基于 GIS 技术的城市暴雨积涝数值模拟与可视化-以哈尔滨市道里区为例.灾害学,2011,26(3):69-72.
- [11] Perla P.The Art of Wargaming.U.S:Naval Institute Press,2012.
- [12] 徐学文,王寿云.现代作战模拟.北京:科学出版社,2001.
- [13] Chen P, Zhang J Q, Sun Y Y, Liu X J.Wargamemapping and implementation for emergency evacuation of residents in urban waterlogging disaster.Journal of Risk Analysis and Crisis Response,2018,8(1):43-51.
- [14] Chen P, Zhang J Q, Zhang L F,Sun Y Y. Evaluation of resident evacuations in urban rainstorm waterlogging disasters based on scenario simulation: Daoli District (Harbin, China) as an example. International Journal of Environmental Research and Public Health,2014,11(10):9965-9978.
- [15] Chen P, Zhang J Q,Sun Y Y, Liu X J.Wargamesimulation theory and evaluation method for emergency evacuation of residents from urban waterlogging disaster area. International Journal of Environmental Research and Public Health,2016, 13(12):2-19.
- [16] 陈鹏,张继权,孙滢悦,刘晓静.城市内涝灾害居民应急避难兵棋推演理论与方法.人民长江,2016,47(14):7-11.
- [17] 陈静,付敬奇.贝叶斯网络在火灾报警系统中的应用.仪表技术,2011,10:47-51.