

考虑决策偏好的城市群应急协调超网络模型^①

曹杰^{1,2}, 朱莉^{1,2}

(1. 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044;
2. 南京信息工程大学经济管理学院, 南京 210044)

摘要: 针对跨城市灾害或单个城市资源紧缺的情况, 提出由出救点、中转点和受灾点构成的多层次城市群应急协调超网络模型. 考虑应急响应时间和成本等因素, 确立模型的整体优化目标; 运用随机均衡配流理论, 研究决策偏好下多种应急调配方式的随机选择问题; 分别将优化目标和应急方式的随机选择转化成等价的变分不等式形式; 设计数值算例求解并仿真分析, 验证模型的合理性和有效性, 并对关键参数讨论其决策指导意义.

关键词: 应急; 协调; 城市群; 随机选择; 变分不等式

中图分类号: C931.1; X913.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-9807(2014)11-0033-10

0 引言

随着城市化进程的不断加快, 各邻近城市间社会经济发展紧密相连, 城市灾情易发生连锁反应和放大效应, 单个城域的应急资源在跨区域灾害面前显得脆弱. 为有效抵御重大灾害的侵袭、最大程度地降低灾害事件造成的损失, 不仅需要单个城市内部多应急主体间的资源联动, 更要求应急资源在邻近城市间能够被及时的配置和调度, 以形成统筹规划、合理布局、资源整合的灾害应急协调体系^[1]. 例如, 北京市“十二五”时期应急体系发展规划中就明确提出了与周边省区市建立协作应急处置体系.

城市群应急协调的想法最早源于 Tüfekci^[2] 为应对飓风灾害所提议构建的区域性救援决策支持系统. 此后, 不少学者关注城市群协调问题, 虽然对其概念的表述还未统一, 但认识已渐趋一致, 即城市群由多个邻近城市组成, 彼此间联系紧密, 共同对区域发展产生影响. 如 Costello^[3] 和 Groothedde 等^[4] 通过成本效益分析探讨了跨区域

协调机制的重要性. 史培军^[5]、张永领^[6] 针对突发灾害下如何架构区域性应急救援体系提出了建议. 滕五晓等^[7] 提倡构建“沟通、协调、支援”的多层次、网络状区域应急联动模式. 目前城市群协调的相关研究主要以提出定性概念框架为主, 对具体如何实现各城市间资源的调配, 以及如何刻画应急协调中多层次、多维度、多属性、多目标性的复杂特征等缺乏有效的定量化表达.

城市群应急协调的关键是资源^[6] (包括物资、信息和能量), 其定量分析一般可抽象为应急资源的调配问题. 国内外在“资源布局配置”和“资源调度路径”等方面的研究已较为成熟^[8]. 例如 Haghani 和 Oh^[9] 早在 1996 年就构建了时间窗约束下以总救援成本最小为优化目标的线性网络调配模型. 随后许多学者从不同角度探讨需求/供应或时间约束^[10-13]、多种资源多周期救助^[14-16]、多目标规划^[17-19] 以及模糊场景下^[10, 13] 的应急调配. 还有研究将选定址问题集成到调配运作中, 通过构建两阶段选定址—路径优化模

① 收稿日期: 2012-08-19; 修订日期: 2012-10-12.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71101073; 71273139); 公益性行业(气象)科研专项资助项目(GYHY201106019); 国家科技部软科学资助项目(2010GX55B147).

作者简介: 曹杰(1973—), 男, 安徽舒城人, 博士, 教授. Email: cj@amss.ac.cn

型^[13 20 21]，利用情景规划方法^[22]、混合模糊聚类方法^[23]等确定应急物资储备库在何处选址以及如何规划运输调配。总体上，此类文献大多关注多出救点、多受灾点这一普遍场景下应急主体间的资源调配优化，很少涉及以城市群(圈、带)为背景、具有差异化特征的各应急主体在考虑决策偏好时怎样进行资源协调调配的问题，而这正是本文研究的关注点。

受国内外超网络应用领域研究工作^[24 25]的启发，本文选择以超网络视角研究多种应急方式选择下城市群资源的协调调配运作，为定量刻画不同城市应急网络间的相互作用提供合适理论模型，尤其能够体现各城市在资源协调调配过程中复杂的多层(级)、多目标、多属性、多维度等特征^[24]：1) 多层级，至少包括出救点、中转点和受灾点等不同层级的多个应急主体相互关联；2) 流量的多维性，可通过铁路、公路、水运和航空等多种调配方式输送食品或药品类救灾资源；3) 多准则，应急调配优化中既要考虑路径选择又有调配方式的选择，且优化目标也需要同时考虑时间、成本、需求满足率等；4) 拥塞性，应急救援过

程中的资源调配易出现拥堵现象；5) 协调性，城市群全局优化和各城市个体优化需均衡协调。

1 超网络模型构建

以城市 A 和 B 为例，构造图 1 左部用来表示城市群应急协调的简单超网络结构，实际城市的个数可不受限制地被扩展至多个情形。具体地，将单个城市中典型的应急资源调配过程抽象成一个三层级网络^[11]：应急资源由各出救点送至做临时储备之用的各中转点，再由各中转点配至各受灾点。面对重大突发事件，邻近城市的不同应急网络需要高度协同集成，这表现为各城市内部应急主体不但与本城市中应急主体紧密合作、也可接受邻近城市应急主体的资源救助。由于不同城市内应急主体具有不同的多维属性、且这些多维属性相互关联，故如图 1 左部的城市群应急协调网络是一个超网络结构，它包含不同性质却相互作用的两个网络。其中，实线表示相邻层级应急主体间的资源调配流量，虚线则表示不同城市应急网络之间的相互协调关系。

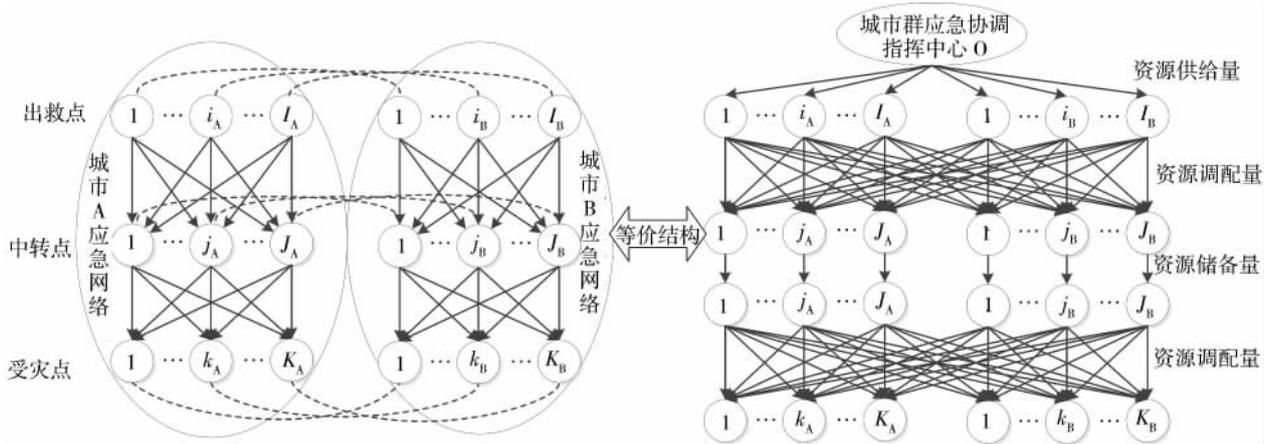


图 1 城市群应急协调的超网络及其等价结构

Fig. 1 Super network of emergency response coordination for urban agglomeration and its equivalent structures

为便于定量分析，可将城市群应急协调超网络转化成与之功能等价的网络结构进行建模^[25]，如图 1 右部所示。在这个等价结构中，虚拟地增设决策者角色的城市群应急协调指挥中心 O 作为资源调配网络的起点，受灾点是网络的讫点、中间节点有出救点和中转点；增添新的连接边体现资源协调运作，反映城市内出救点与其它城市中转点、城市内中转点与其它城市受灾点之间

存在关联关系；将应急资源调配体系所涉的各项活动抽象地用网络相邻层级节点间的有向连接边来表达，由上至下实线边流量的含义分别是各出救点处的资源供给量、各出救点至各中转点以多种应急方式调配的资源量、各中转点处的资源储备量、以及各中转点至各受灾点以多种应急方式调配的资源量。

由文献[25]，类似于供应链交易网络的应急网络与交通运输网络之间存在着等价同构关系，故可

以通过对图 1 右部的等价结构进行建模分析,从而得出城市群应急资源协调调配优化方案. 针对图 1 所示的超网络及其等价结构,分两阶段构建超网络模型: 首先基于各受灾点处资源需求,在符合应急能力的前提下,量化表达整个超网络应急协调的优化目标; 然后考虑应急决策偏好问题,着重分析出救点至中转点、以及中转点至受灾点的资源调配层级中多种应急方式的随机选择.

1.1 超网络优化目标

面对灾害的应急救助过程需重点关注两个问题: 1) 应急资源的配给量是否达到需求; 2) 应急资源配给对于受灾点的时效性. 基于此,城市群应急资源调配优化问题可被表达成式 (1),在满足需求和符合应急能力限制的前提下,确定最优的资源流量和应急能力追加量,以实现整个应急救助过程所耗成本和时间的最小化. 其中,应急成本涉及两个方面: 实施应急资源救助的成本、和应对灾害非常态而需追加应急能力的成本. 用 $g_a(f_a, \mu_a, s_a, r_a)$ 表示含时间和成本因素的广义应急目标,下称广义应急成本

$$\begin{aligned} \min \quad & \sum_{a \in L} g_a(f_a, \mu_a, s_a, r_a) = \sum_{a \in L} c_a(f_a, s_a, r_a) + \\ & \sum_{a \in L} \phi_a(u_a) + \alpha \sum_{a \in L} t_a(f_a, s_a, r_a) \\ \text{s. t.} \quad & \sum_{p \in P_w} x_p \geq d_w(s_w, r_w), \quad f_a \leq \bar{u}_a + u_a, \\ & f_a = \sum_{p \in P} x_p \delta_{ap}, \quad x_p \geq 0, \quad \bar{u}_a + u_a \geq 0 \quad (1) \end{aligned}$$

a 是图 1 右部相邻层级各应急主体间的任一连接边,代表应急救助的不同环节(供给—调配—储备—调配), $a \in L, L$ 是所有边的集合; p 是图 1 右部连接起讫点的任一路径,任一路径 p 由若干条边 a 组成, $p \in P, P$ 是全体路径的集合; 用 w 表示图 1 右部任一起讫点对, $w \in W, W$ 是所有起讫点对的集合; 某一起讫点对 w 之间的路径集合用 P_w 表示,显然 $p \in P_w$.

目标函数中, $c_a(f_a, s_a, r_a)$ 和 $t_a(f_a, s_a, r_a)$ 分别表示在各应急环节实施资源救助所耗的成本和时间,与资源流量 f_a 、承灾能力 s_a 、灾害风险度 r_a 有关; $\phi_a(u_a)$ 是指灾害应对中在各环节追加 u_a 单位的应急能力所花费的成本,因为灾害的发生会导致某类资源需求量陡增,需通过诸如社会各界援助方式来增加各出救点处对此类资源的供给能

力; α 是应急决策优化中时间因素相对于成本因素的转换系数,体现应急场景下时间因素的重要程度. 其中,承灾能力 s_a 在现实中体现为由于受外界扰动或灾害事件影响而导致应急资源救助活动失效的程度,通常与失效概率和失效后果有关^[26],往往可从“调配网络中哪些连接边易于中断”和“哪些连接边对于整个调配网络运作最为关键”两方面来衡量,这个参数反映了不同应急主体间的属性特征; 而灾害风险度 r_a 是刻画外界灾害强度的一个参量, r_a 越大,受灾越严重,救助所需的成本越大、所耗时间越长,在实际应急中可由科学方法监测而得(如台风强度可依赖气象部门的预报获知).

约束条件中, $\sum_{p \in P_w} x_p \geq d_w(s_w, r_w)$ 表示各起讫点对之间的需求 $d_w(s_w, r_w)$ 必须被来自各可行路径上的应急资源总量所满足,其中 x_p 是路径 p 上的应急资源流量; $f_a \leq \bar{u}_a + u_a$ 是对各边上资源流量的限制条件,限定其不能超过现有应急能力 \bar{u}_a 与追加应急能力 u_a 之和; $f_a = \sum_{p \in P} x_p \delta_{ap}$ 是路径 / 边的流量关联关系式,指任一边上资源流量等于经过此条边的各路径上流量之和,若边 a 包含在路径 p 中, $\delta_{ap} = 1$, 否则 $\delta_{ap} = 0$; 约束的最后两项是对路径流量和应急能力的非负限制.

假设优化目标中的相关成本和时间函数是连续可微凸函数^[24, 25], 利用拉格朗日乘子 β_a 和 λ_w , 将优化问题 (1) 转化成等价的变分不等式 (2) 进行求解分析. 式中, $C_p = \sum_{a \in L} c_a \delta_{ap}, T_p = \sum_{a \in L} t_a \delta_{ap}$ 分别是调配资源经过路径 p 所花费的成本和时间. β_a 可看成是追加单位应急能力时所耗的费用, λ_w 可理解为起讫点对 w 间资源供需相等时的最小救助成本.

$$\begin{aligned} \sum_{p \in P} \left(\frac{\partial C_p}{\partial x_p} + \alpha \frac{\partial T_p}{\partial x_p} + \sum_{a \in L} \beta_a^* \delta_{ap} - \lambda_w^* \right) \times (x_p - x_p^*) + \\ \sum_{a \in L} \left(\frac{\partial \phi_a(u_a^*)}{\partial u_a} - \beta_a^* \right) \times (u_a - u_a^*) + \\ \sum_{a \in L} \left(\bar{u}_a + u_a^* - \sum_{p \in P} x_p^* \delta_{ap} \right) \times (\beta_a - \beta_a^*) + \\ \left(\sum_{p \in P_w} x_p^* - d_w(s_w, r_w) \right) \times (\lambda_w - \lambda_w^*) \geq 0 \quad (2) \end{aligned}$$

1.2 决策偏好下对应急方式的随机选择

在图 1 右部所示的两个资源调配运作层级中,面对 M 种可替代的应急调配方式(如公路、铁路、水路),决策者会通过综合权衡对各种方式的偏好程度以及各应急主体特征属性来进行合理选择.用 $f_{(2)a}$ 和 $f_{(4)a}$ 分别表示“出救点至中转点”、“中转点至受灾点”间的应急资源调配量,而 $f_{(2)a}^m$ 和 $f_{(4)a}^m$ 则特指相应层级选用第 m 种应急方式所调配的资源量,有: $f_{(2)a} = \sum_{m \in M} f_{(2)a}^m, f_{(4)a} = \sum_{m \in M} f_{(4)a}^m$.

由于应急情境下存在信息不对称现象,故在选择应急方式时,决策者通常只能对运用各方式调配资源所耗费的广义应急成本做一个大致估计.现用 $G_{(2)a}^m(f_{(2)a}^m, s_{(2)a}^m, r_{(2)a}^m), G_{(4)a}^m(f_{(4)a}^m, s_{(4)a}^m, r_{(4)a}^m)$ 来分别表示“出救点至中转点”、“中转点至受灾点”间选择第 m 种方式调配资源所耗广义费用的估计值(称理解广义应急成本),而 $g_{(2)a}^m(f_{(2)a}^m, s_{(2)a}^m, r_{(2)a}^m), g_{(4)a}^m(f_{(4)a}^m, s_{(4)a}^m, r_{(4)a}^m)$ 则是相应广义费用的实际值(称实际广义应急成本),它们之间存在如下关系

$$G_{(2)a}^m = g_{(2)a}^m - \frac{1}{\theta} \xi_{(2)a}^m, \tag{3}$$

$$G_{(4)a}^m = g_{(4)a}^m - \frac{1}{\eta} \xi_{(4)a}^m$$

设 $\xi_{(2)a}^m$ 和 $\xi_{(4)a}^m$ 是服从 Gumbel 分布且相互独立的随机变量,可证明^[27]: $Var(G_{(2)a}^m) = \frac{\pi^2}{6\theta^2}, Var(G_{(4)a}^m) = \frac{\pi^2}{6\eta^2}$, 参数 $\theta > 0, \eta > 0$ 是决策者对以各种方式调配资源所耗广义应急成本了解程度的一种测度,它们与理解广义应急成本的方差成反比.

在以各方式调配所耗实际广义应急成本的度量中,往往也涉及决策者的选择偏好,体现在对各种应急方式选择时会综合考虑 N 个因素(如成本、时间、灵活便捷性).记 $g_{(2)an}^m, g_{(4)an}^m$ 分别是两调配层第 m 种应急方式在第 n 个因素方面的实际所耗广义费用, γ_n^m 是第 m 种应急方式在第 n 个因

素方面的衡量权重,有

$$g_{(2)a}^m = \sum_{n \in N} \gamma_n^m g_{(2)an}^m, \tag{4}$$

$$g_{(4)a}^m = \sum_{n \in N} \gamma_n^m g_{(4)an}^m$$

用 $P_{(2)a}^m$ 和 $P_{(4)a}^m$ 分别表示两调配层级上选用应急方式 m 的概率.由式(1)可知,方式 m 被选中的概率就是运用此种方式调配资源时其理解广义应急成本达到最小的概率,故有

$$P_{(2)a}^m = \text{Prob}[G_{(2)a}^m = \min_{m' \in M} G_{(2)a}^{m'}], \tag{5}$$

$$P_{(4)a}^m = \text{Prob}[G_{(4)a}^m = \min_{m' \in M} G_{(4)a}^{m'}]$$

根据 Gumbel 分布的性质,应急方式的选择概率可表达成如下形式

$$P_{(2)a}^m = \frac{1}{1 + \sum_{m' \neq m} \exp(-\theta(g_{(2)a}^{m'} - g_{(2)a}^m))}, \tag{6}$$

$$P_{(4)a}^m = \frac{1}{1 + \sum_{m' \neq m} \exp(-\eta(g_{(4)a}^{m'} - g_{(4)a}^m))}$$

令 $S(g_{(2)a}^m)$ 和 $S(g_{(4)a}^m)$ 分别表示两调配层级中多种方式选择的期望最小理解广义应急成本,由文献[27], $S(g_{(2)a}^m), S(g_{(4)a}^m)$ 各自关于 $g_{(2)a}^m, g_{(4)a}^m$ 的偏导数是相应层级第 m 种应急方式被选中的概率,即

$$\frac{\partial S(g_{(2)a}^m)}{\partial g_{(2)a}^m} = P_{(2)a}^m, \tag{7}$$

$$\frac{\partial S(g_{(4)a}^m)}{\partial g_{(4)a}^m} = P_{(4)a}^m$$

结合式(6)和式(7),期望最小理解广义应急成本的函数表达可写成

$$S(g_{(2)a}^m) = -\frac{1}{\theta} \ln\left(\sum_{m' \in M} \exp(-\theta g_{(2)a}^{m'})\right), \tag{8}$$

$$S(g_{(4)a}^m) = -\frac{1}{\eta} \ln\left(\sum_{m' \in M} \exp(-\eta g_{(4)a}^{m'})\right)$$

综合上述分析,决策偏好下应急方式的选择实际是一个随机用户均衡问题.运用随机均衡配流理论,所有满足如下流量守恒条件的资源量均为可行均衡解

$$f_{(2)a}^m = f_{(2)a} \cdot P_{(2)a}^m, f_{(4)a}^m = f_{(4)a} \cdot P_{(4)a}^m \tag{9}$$

为便于求解分析,将以上随机均衡配流问题转化成等价的变分不等式,即决策偏好下以各种方式实施应急调配的最优资源量满足

$$\sum_{(2) a \in (J_A \cup J_B)^* (J_A \cup J_B)} \sum_{m \in M} \{ g_{(2)a}^m + \frac{1}{\theta} (\ln f_{(2)a}^{m*} - \ln f_{(2)a}) - S(g_{(2)a}) \} \times (f_{(2)a}^m - f_{(2)a}^{m*})$$

$$\sum_{(4) a \in (J_A \cup J_B)^* (K_A \cup K_B)} \sum_{m \in M} \{ g_{(4)a}^m + \frac{1}{\eta} (\ln f_{(4)a}^{m*} - \ln f_{(4)a}) - S(g_{(4)a}) \} \times (f_{(4)a}^m - f_{(4)a}^{m*}) \geq 0 \tag{10}$$

2 超网络模型求解

对所构建的超网络模型实施数值求解,分为两个步骤: 首先使用 Euler 算法^[24 25] 求解变分不等式(2), 得出四个应急环节上(供给—调配—储备—调配)的最优资源量, 分别用 $f_{(1)a}^*$ 、 $f_{(2)a}^*$ 、 $f_{(3)a}^*$ 和 $f_{(4)a}^*$ 加以区分; 然后代入变分不等式(10) 并运用相继平均法 (method of successive average, MSA)^[24 28] 对其进行求解, 计算出两个资源调配运作层中以多种应急方式调配的最优资源量 $f_{(2)a}^{m*}$ 和 $f_{(4)a}^{m*}$.

2.1 算例构造

假设城市 A 和 B 各有两个出救点、两个中转点、两个受灾点, 算例中城市群应急协调超网络的等价结构共有 40 条连接边、64 条路径、8 个起讫点对: ① 按照连接网络层级的不同将 40 条边分成四类, 在表 1 中列出不同类别边的相关函数和参数设置. 为便于算例求解, 将此类函数设置为

满足连续、可微、凸性的简单常用形式^[24 25], 具有一定代表性, 现实应急中可根据实际情况作不同程度的改变. ② 64 条路径由分别来自 4 个类别的边组成, 其中前 32 条代表以城市 A 中的受灾点为迄点的路径, 后 32 条则以城市 B 中的受灾点为迄点. ③ 8 个起讫点对中, $w = 1, \dots, 4$ 是以城市 A 中两受灾点为迄点的点对, 而 $w = 5, \dots, 8$ 的迄点是城市 B 中受灾点.

设应急过程中可采取 3 种方式调配资源实施救助, 分别是公路 ($m = 1$)、铁路 ($m = 2$)、水路 ($m = 3$); 在对多种方式进行选择决策时衡量 2 个因素, 分别是成本 ($n = 1$)、时间 ($n = 2$). 将各种应急方式选择下的决策偏好参数列于表 2, 主要包括各应急方式在各衡量因素上的实际广义费用函数及相应权重. 为突显应急资源调配过程中时间要素的重要性, 设应急优化目标中的转换系数 $\alpha = 10$. 各起讫点对间资源需求函数设为 $d_w (s_w, r_w) = r_w - s_w$, 且 $r_w = 0.8, s_w = 0.2$. 并令决策偏好下随机选择模型中的参数值 $\theta = 0.5, \eta = 1$.

表 1 城市群超网络算例仿真中不同类别的参数设置

Table 1 Parameter settings for different categories simulation of super network for urban agglomeration

四类连接边	起点	终点	$c_a(f_a, s_a, r_a)$	$\phi_a(u_a)$	$t_a(f_a, s_a, r_a)$	s_a	r_a	\bar{u}_a
$a = 1, \dots, 4$	指挥中心	出救点	$(1 - s_a + r_a)f_a$	$u_a^2 + u_a$	$(2 - 2s_a + r_a)f_a$	0.8	0.2	2
$a = 5, \dots, 20$	出救点	中转点	$(2 - 3s_a + r_a)f_a$	$u_a^2 + 5u_a$	$(3 - 2s_a + r_a)f_a$	0.6	0.5	1
$a = 21, \dots, 24$	中转点	中转点	$(1 - s_a + 2r_a)f_a$	$2u_a^2 + 3u_a$	$(2 - s_a + 3r_a)f_a$	0.8	0.3	3
$a = 25, \dots, 40$	中转点	受灾点	$(3 - 2s_a + r_a)f_a$	$0.5u_a^2 + u_a$	$(3 - s_a + 2r_a)f_a$	0.5	0.8	1

表 2 多种应急方式选择下的决策偏好参数设置

Table 2 Decision preference parameters settings under various emergency modes

		公路	铁路	水路
调配层(2) a	成本	$(1 - s_{(2)a}^1 + r_{(2)a}^1)f_{(2)a}^1 + 5$ $\gamma_1^1 = 0.2$	$(2 - 2s_{(2)a}^2 + r_{(2)a}^2)f_{(2)a}^2 + 3$ $\gamma_1^2 = 0.6$	$(2 - s_{(2)a}^3 + 3r_{(2)a}^3)f_{(2)a}^3 + 2$ $\gamma_1^3 = 0.9$
	时间	$(2 - s_{(2)a}^1 + r_{(2)a}^1)f_{(2)a}^1 + 3$ $\gamma_2^1 = 0.8$	$(1 - s_{(2)a}^2 + 2r_{(2)a}^2)f_{(2)a}^2 + 1$ $\gamma_2^2 = 0.4$	$(2 - s_{(2)a}^3 + 2r_{(2)a}^3)f_{(2)a}^3 + 4$ $\gamma_2^3 = 0.1$
调配层(4) a	成本	$(2 - s_{(4)a}^1 + r_{(4)a}^1)f_{(4)a}^1 + 5$ $\gamma_1^1 = 0.2$	$(1 - 2s_{(4)a}^2 + 3r_{(4)a}^2)f_{(4)a}^2 + 3$ $\gamma_1^2 = 0.6$	$(1 - s_{(4)a}^3 + 2r_{(4)a}^3)f_{(4)a}^3 + 2$ $\gamma_1^3 = 0.9$
	时间	$(2 - s_{(4)a}^1 + 2r_{(4)a}^1)f_{(4)a}^1 + 1$ $\gamma_2^1 = 0.8$	$(2 - 2s_{(4)a}^2 + r_{(4)a}^2)f_{(4)a}^2 + 2$ $\gamma_2^2 = 0.4$	$(3 - s_{(4)a}^3 + 3r_{(4)a}^3)f_{(4)a}^3 + 4$ $\gamma_2^3 = 0.1$

注: $s_{(2)a}^1 = 1, r_{(2)a}^1 = 0.1; s_{(2)a}^2 = 0.1, r_{(2)a}^2 = 1; s_{(2)a}^3 = 0.5, r_{(2)a}^3 = 0.8; s_{(4)a}^1 = 0.6, r_{(4)a}^1 = 0.4; s_{(4)a}^2 = 0.8, r_{(4)a}^2 = 0.4; s_{(4)a}^3 = 0.3, r_{(4)a}^3 = 0.7$.

2.2 算例求解

在 MATLAB R2010b 实现求解使用的 Euler 算法和 MSA 算法. 将表 1 中参数和所设需求函数代入变分不等式 (2), 输入变量初始值均设为 1, 收敛精度为 0.000 1. 得出各路径上有相等的最优资源量 $x_p^* = 0.070 6$, 并将此算例求解的其它部分结果列于表 3 第 2 列, 其中 f_a^* 的值由 $f_a = \sum_{p \in P} x_p \delta_{ap}$ 计算出. 基于所得 $f_{(2)a}^*$ 和 $f_{(4)a}^*$ 值, 结合表 2 和相关参数设置, 求解变分不等式 (10), 可以得出考虑决策偏好的三种应急方式随机选择下最优资源调配量, 见表 4 第 2 列.

从这个算例求解的结果(表 3 第 2 列, 表 4 第 2 列) 可以看出:

1) 64 条路径上的最优资源量均相等, 8 个起讫点对间的最小救助成本均相同. 原因是两城市受灾点处具有相同的资源需求量, 而且构成任

一资源救助路径的 4 条边虽分别代表了 4 个不同的应急环节, 但每一环节内的所有函数和参数设置也均相同(参见表 1).

2) 所有的 $u_a^* = 0$, 即各环节均无需追加额外成本去提高资源供给、储备和调配的能力. 这表明此算例中各应急主体的现有能力能够对应应急状况.

3) 4 个出救点处资源供给总量, 与出救点至中转点的资源调配总量、4 个中转点处资源储备总量、中转点至受灾点的资源调配总量均相等. 这客观体现了整个超网络结构的均衡状态, 间接验证了所构模型及求解的合理性.

4) 采用三种方式调配的最优资源量各不相同. 这是由于决策者对公路、铁路、水路三种应急方式在成本和时间两衡量因素上的选择偏好不同所致(参见表 2).

表 3 超网络模型算例仿真及参数分析的部分最优解

Table 3 Super network model simulation and part of the optimal solution for parameter analysis

部分最优解		模型求解结果	需求变化情况	\bar{u}_a 变化情况	区分区域/跨域情况
u_a^*	$a = 1, \dots, 4$	0	0	0.926 7	0
	$a = 5, \dots, 20$	0	0	0.081 7	0
	$a = 21, \dots, 24$	0	0	0.920 4	0
	$a = 25, \dots, 40$	0	0	0.082 4	0
λ_w^*	$w = 1, \dots, 4$	6.755 1	6.828 0 (A 受灾点) ↑	22.559 3 ↑	5.946 8 (同城点对)
	9.085 6 (B 受灾点) ↑		6.003 8 (跨城点对)		
f_a^*	$a = 1, \dots, 4$	1.129 3	1.330 2 ↑	1.132 1	1.129 3
	$a = 5, \dots, 20$	0.282 3	0.332 6 ↑	0.283 0	0.273 1 (同城边)
	$a = 21, \dots, 24$	1.129 3	1.330 2 ↑	1.132 1	0.291 6 (跨城边)
	$a = 25, \dots, 40$	0.282 3	0.285 4 (A 受灾点) ↑	0.283 0	0.257 5 (同城边)
			0.379 7 (B 受灾点) ↑		0.307 1 (跨城边)

3 参数的仿真分析

对所构超网络模型中相关参数做敏感性分析, 观察其变化如何影响整个城市群应急协调调配方案.

1) 需求不同的情况

当以不同城市受灾点为讫点的资源需求量不同时, 对模型求解分析. 如令 $r_{w=1, \dots, 4} = 0.8$ 、 $s_{w=1, \dots, 4} = 0.2$; $r_{w=5, \dots, 8} = 0.9$ 、 $s_{w=5, \dots, 8} = 0.1$.

得 $x_p^* (p = 1, \dots, 32) = 0.071 3$ 、 $x_p^* (p = 33, \dots, 64) = 0.094 9$. 即 64 条路径按前后 32 条被分成两个类别, 相同类别路径上的最优资源量均相等, 且前一类(前 32 条路径)的资源量小于后一类. 原因是讫点至城市 B 两受灾点的资源需求量比城市 A 两受灾点处所需的要大, 验证了需求的增加会引起各路径上调配资源量的增大.

另将其它部分结果列于表 3 第 3 列, 与第 2 列比较发现:

(1) 各应急环节上的资源量、以及所有起讫

点对点的最小救助成本都变大(表中用向上箭头标注)。这是由于应急资源需求的增大使得需要提供更多的资源实施救助,从而救助耗费随之增加。

(2) 以不同城市受灾点为讫点的调配资源量和最小救助成本都显现出了区别。具体地,从中转点配至城市 B 受灾点处的资源量更大(0.379 7 > 0.285 4),以城市 B 受灾点为讫点的起讫点对点最小救助成本也更大(9.085 6 > 6.828 0)。原因仍是城市 B 受灾点处需求的增大所致。

2) \bar{u}_a 的变化

改变体现各应急主体(间)属性特征的现有应急能力 \bar{u}_a , 例如减小表 1 中所有 \bar{u}_a 值, 令 $\bar{u}_a = 0.2$, 其它参数不变, 得 $x_p^* = 0.070 8$, 并将其它部分最优解列于表 3 第 4 列。

与模型求解结果(表 3 第 2 列)相比发现:

(1) u_a^* 和 λ_w^* 的值变化较大。所有环节的应急能力追加都变为正数, 即不仅出救点处的供给和中转点处的储备无法满足现有应急状况, 且出救点到中转点、中转点到受灾点这两环节也需要通过诸如加大运力投入等方式来增强应急调配能力。各起讫点对点的最小救助成本明显增大(上箭头标注), 这反映了整个应急过程加大能力追加的力度会使得成本耗费显著增加。

(2) 各路径/调配边上最优资源量无明显变化, 即改变现有应急能力对最优资源量的影响并不大。这主要归因于此算例未改变资源需求函数, 说明在应急场景下, 救助网络中最优资源量的分配

决策较大程度是基于各受灾点需求的驱动。

3) 同城/跨城边属性的区分

在两个资源调配层级中, 连接边均可被分为两类: 同城调配和跨城调配。同城调配是指资源发送点与资源接收点(如出救点与中转点、或中转点与受灾点)都同属于一个城市, 当它们分处不同城市时则被称为跨城协调调配。同理, 起点和讫点同属于一个城市的起讫点对被记为同城点对, 否则为跨城点对。更换超网络等价结构中跨城调配边的相关参数设置, 目的是观察当区分同城跨城救助不同特征时, 最优资源调配方案的变化情况。例如令跨城连接边的 $s_a = 0.7, r_a = 0.2$, 其它参数不变, 将所得结果列于表 3 最后一列, 与表 3 第 2 列比较发现:

不仅同城/跨城点对点最小救助成本呈现区别, 且两调配层级的最优资源量也在同城与跨城连接边上有所差异。具体来说, 跨城边上承灾能力的增大、灾害风险度的减小使更多资源来自于跨城间救助(0.291 6 > 0.273 1, 0.307 1 > 0.257 5), 导致跨城点对点最小救助成本高于同城点对的(6.003 8 > 5.946 8)。这说明城市群应急协调超网络的最优调配方案不只与各城市受灾点处需求量有关, 也与各城市应急主体间不同的属性特征密切相关。

4) 影响决策偏好的相关参数

采用模型求解算例中三种应急方式下的最优资源调配量作为基准比对数据, 讨论决策偏好相关参数的变化影响, 见表 4。

表 4 决策偏好相关参数变化下以各种应急方式调配的最优资源量

Table 4 The optimal amount of emergency distribution resources under different decision preference parameters

各方式下的资源量	模型求解 (基准对比)	灾害变化		决策偏好变化		随机参数变化	
		$s_{(2)a}^2 = 1$ $s_{(4)a}^3 = 1$	$r_{(2)a}^1 = 1$ $r_{(4)a}^2 = 1$	$\gamma_1^1 = 0.5$ $\gamma_2^1 = 0.5$	$\gamma_1^3 = 0.6$ $\gamma_2^3 = 0.4$	$\theta = 0.000 1$ $\eta = 0.000 1$	$\theta = 10 000$ $\eta = 10 000$
$f_{(2)a}^{1*}$	0.068 3	0.066 1	0.066 9 ↓	0.055 2	0.074 9	0.094 1	0
$f_{(2)a}^{2*}$	0.109 4	0.114 4 ↑	0.110 2	0.116 2	0.118 7	0.094 1	0.161 8
$f_{(2)a}^{3*}$	0.104 6	0.101 8	0.105 2	0.110 9	0.088 7	0.094 1	0.120 3
$f_{(4)a}^{1*}$	0.124 4	0.122 5	0.126 9	0.062 9	0.141 9	0.094 1	0.238 0
$f_{(4)a}^{2*}$	0.069 8	0.068 5	0.065 5 ↓	0.099 8	0.081 9	0.094 1	0
$f_{(4)a}^{3*}$	0.088 1	0.091 4 ↑	0.089 9	0.119 6	0.058 5	0.094 1	0.044 2

(1) 改变各种方式下对应的承灾能力和灾害风险度, 观察灾害变化所致应急方式选择的不同。例如将两调配层级中承灾能力最小的 $s_{(2)a}^2$ 和

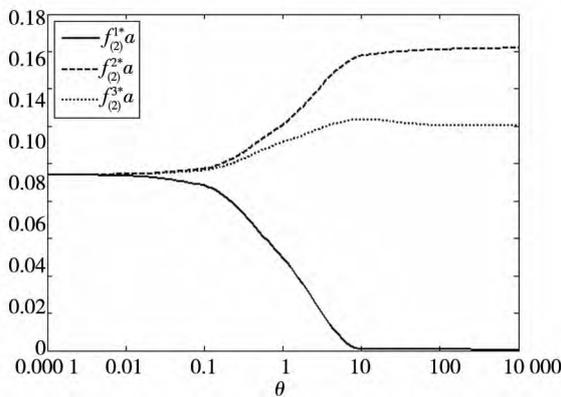
$s_{(4)a}^3$ 都增至 1, 其它参数不变, 发现如表 4 第 3 列所示, 除 $f_{(2)a}^{2*}$ 和 $f_{(4)a}^{3*}$ 增大外(上箭头标注), 以其它方式调配的最优资源量均减小; 若将两调配层

级中灾害风险度最小的 $r_{(2)a}^1$ 和 $r_{(4)a}^2$ 都增至 1, 其它参数不变, 会造成 $f_{(2)a}^{1*}$ 和 $f_{(4)a}^{2*}$ 的减小(下箭头标注)、以及采用其它方式调配资源量的增大. 这表明某种应急方式的承灾能力越大或是灾害风险度越小, 都会导致以此种方式调配的资源量增多、而选择其它方式的资源量相应减少.

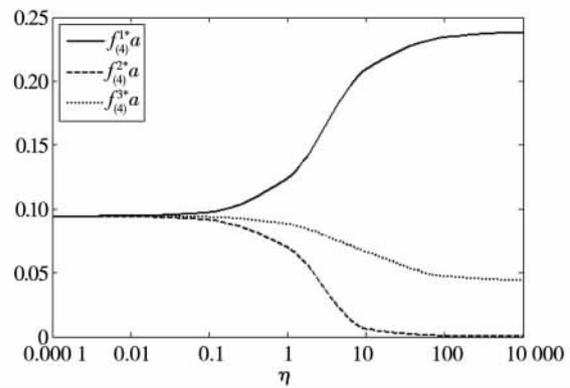
(2) 变动决策者在不同应急情境中对各方式的权重偏好参数, 观察其影响. 例如改变表 2 中各应急方式在各衡量因素方面的权重, 若将公路方式在成本(γ_1^1) 和时间(γ_2^1) 上的权重都设为 0.5, 或令水路方式在成本(γ_1^3) 和时间(γ_2^3) 上的权重分别是 0.6 和 0.4, 其它参数不变, 结果都会使三种应急方式下的最优资源调配数量发生较大变化, 见表 4 第 4 列.

(3) 分析随机选择模型中参数 θ 和 η 对多种

应急方式调配资源的影响. 若将 θ 和 η 的值都减小至趋于 0, 例如当 $\theta = 0.0001$ 时, 出现以几乎相同概率选择各应急方式的现象, 即以三种方式调配的最优资源量均相等; 反之, 若大幅增大 θ 和 η 至 10 000, 发现对各种方式的选择区别变大, 体现在三种方式下的最优资源调配量呈明显差异性(见表 4 第 5 列). 这验证了 θ 和 η 可用来表征决策者对以各方式调配所耗广义应急成本的掌握程度, 如图 2 所示: θ 和 η 的值越小, 表明决策者越不了解各种方式所致的成本, 以致对选用各种应急方式的偏好差别越大, 使各种方式逐步有几乎均等的机会被选择; 而增大 θ 和 η 意味着决策者具有相对更明确的认知, 导致随机偏好的区别变小, 逐渐有某种方式必然不被选择的情况发生.



(a) θ 变化对各应急方式决策偏好的影响



(b) η 变化对各应急方式决策偏好的影响

图 2 随机参数影响下多种应急方式的选择

Fig. 2 Selection of various emergency modes under the influence of random parameters

4 结束语

本文通过构建由出救点、中转点、受灾点组成的多层级超网络, 提出了考虑决策者对多种应急方式有选择偏好时的城市群协调理论模型. 设计典型算例对模型进行仿真求解和参数分析, 实验结果表明各城市应急主体(间)的现有应急能力/承灾能力/灾害风险度、各受灾点处需求、以及决

策者对各应急方式的选择偏好等因素都不同程度的影响着城市群资源协调方案的优化设计. 这些结论对制定相关应急政策具有指导意义, 为不同情形下城市群应急协调的科学决策提供有益思考. 未来研究将进一步考虑应急情景中需求信息模糊对资源调配决策的影响, 还将探讨灾害事件实时变化时城市群应急协调超网络的动态优化过程.

参考文献:

[1] 曹杰, 杨晓光, 汪寿阳. 突发公共事件应急管理研究中的重要科学问题[J]. 公共管理学报, 2007, 4(2): 84-93.
Cao Jie, Yang Xiaoguang, Wang Shouyang. Key scientific problems in public emergency management[J]. Journal of Public

- Management ,2007 ,4(2) : 84 -93. (in Chinese)
- [2]Tüfekci S. An integrated emergency management decision support system for hurricane emergencies [J]. Safety Science , 1995 ,20(1) : 39 -48.
- [3]Costello K W. Interregional coordination versus RTO mergers: A cost-benefit perspective [J]. The Electricity Journal ,2001 , 14(2) : 13 -24.
- [4]Grootedde B ,Ruijgrok C ,Tavasszy L. Towards collaborative , intermodal hub networks: A case study in the fast moving consumer goods market [J]. Transportation Research Part E ,2005 ,41(6) : 567 -583.
- [5]史培军. 制定国家综合减灾战略、提高巨灾风险防范能力 [J]. 自然灾害学报 ,2008 ,17(1) : 1 -8.
Shi Peijun. Establishing national integrated disaster reduction strategy and improving catastrophe risk governance capacity [J]. Journal of Natural Disasters ,2008 ,17(1) : 1 -8. (in Chinese)
- [6]张永领. 应急资源的区域联动研究 [J]. 经济与管理 ,2011 ,25(6) : 91 -95.
Zhang Yongling. On regional joint action of emergency resources [J]. Economy and Management ,2011 ,25(6) : 91 -95. (in Chinese)
- [7]滕五晓,王 清,夏剑霏. 危机应对的区域应急联动模式研究 [J]. 社会科学 ,2010 ,(7) : 63 -68.
Teng Wuxiao ,Wang Qing ,Xia Jianwei. Research on regionally integrated emergency response system [J]. Journal of Social Sciences ,2010 ,(7) : 63 -68. (in Chinese)
- [8]何建敏,刘春林,曹 杰,等. 应急管理 与 应急系统——选址、调度与算法 [M]. 北京: 科学出版社,2005.
He Jianmin ,Liu Chunlin ,Cao Jie ,et al. Emergency Management and Emergency System: Location ,Dispatch and Algorithm [M]. Beijing: Science Press ,2005. (in Chinese)
- [9]Haghani A ,Oh S C. Formulation and solution of a multi-commodity , multi-modal network flow model for disaster relief operations [J]. Transportation Research Part A ,1996 ,30(3) : 231 -250.
- [10]刘春林,何建敏,盛昭瀚. 应急系统调度问题的模糊规划方法 [J]. 系统工程学报 ,1999 ,14(4) : 351 -355 ,365.
Liu Chunlin ,He Jianmin ,Sheng Zhaohan. Fuzzy programming for scheduling problem in emergency systems [J]. Journal of Systems Engineering ,1999 ,14(4) : 351 -355 ,365. (in Chinese)
- [11]唐伟勤,陈荣秋,赵 曼,等. 大规模突发事件快速消费品的应急调度 [J]. 科研管理 ,2010 ,31(2) : 121 -125.
Tang Weiqin ,Chen Rongqiu ,Zhao Man ,et al. Dispatching of fast consumption goods in large-scale emergency [J]. Science Research Management ,2010 ,31(2) : 121 -125. (in Chinese)
- [12]曹 杰,朱 莉. 现代应急管理 [M]. 北京: 科学出版社,2011.
Cao Jie ,Zhu Li. Modern Emergency Management [M]. Beijing: Science Press ,2011. (in Chinese)
- [13]李守英,马祖军,郑 斌,等. 洪灾被困人员搜救问题的集成优化研究 [J]. 系统工程学报 ,2012 ,27(3) : 287 -294.
Li Shouying ,Ma Zujun ,Zheng Bin ,et al. Integrated optimization of searching for trapped personnel in flood disaster [J]. Journal of Systems Engineering ,2012 ,27(3) : 287 -294. (in Chinese)
- [14]戴更新,达庆利. 多资源组合应急调度问题的研究 [J]. 系统工程理论与实践 ,2000 ,20(9) : 52 -55.
Dai Gengxin ,Da Qingli. The study of combinatorial scheduling problem in emergency systems [J]. Systems Engineering: Theory & Practice ,2000 ,20(9) : 52 -55. (in Chinese)
- [15]Barbarosoglu G ,Arda Y. A two-stage stochastic programming framework for transportation planning in disaster response [J]. Journal of the Operational Research Society ,2004 ,55(1) : 43 -53.
- [16]王新平,王海燕. 多疫区多周期应急物资协同优化调度 [J]. 系统工程理论与实践 ,2012 ,32(2) : 283 -291.
Wang Xinping ,Wang Haiyan. Optimal multi-period collaborative scheduling of emergency materials for multiple epidemic areas [J]. Systems Engineering: Theory & Practice ,2012 ,32(2) : 283 -291. (in Chinese)
- [17]胡祥培,孙丽君,王雅楠. 物流配送系统干扰管理模型研究 [J]. 管理科学学报 ,2011 ,14(1) : 50 -60.
Hu Xiangpei ,Sun Lijun ,Wang Ya'nan. A model for disruption management in urban distribution systems [J]. Journal of Management Sciences in China ,2011 ,14(1) : 50 -60. (in Chinese)
- [18]Tzeng G H ,Cheng H J ,Huang T D. Multi-objective optimal planning for designing relief delivery systems [J]. Transportation Research Part E ,2007 ,43(6) : 673 -686.

- [19] Yan S Y, Shih Y L. Optimal scheduling of emergency road way repair and subsequent relief distribution [J]. *Computers & Operations Research*, 2009, 36(6): 2049–2065.
- [20] Yi W, Ozdamar L. A dynamic logistics coordination model for evacuation and support in disaster response activities [J]. *European Journal of Operational Research*, 2007, 179(3): 1177–1193.
- [21] Mete H O, Zabinsky Z B. Stochastic optimization of medical supply location and distribution in disaster management [J]. *International Journal of Production Economics*, 2010, 126(1): 76–84.
- [22] Chang M S, Tseng Y L, Chen J W. A scenario planning approach for the flood emergency logistics preparation problem under uncertainty [J]. *Transportation Research Part E*, 2007, 43(6): 737–754.
- [23] Sheu J B. Dynamic relief-demand management for emergency logistics operations under large-scale disasters [J]. *Transportation Research Part E*, 2010, 46(1): 1–17.
- [24] 王志平, 王众托. 超网络理论及其应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2008.
Wang Zhiping, Wang Zhongtuo. *Supernetwork Theory and Its Application* [M]. Beijing: Science Press, 2008. (in Chinese)
- [25] Nagurney A. On the relationship between supply chain and transportation network equilibria: A supernetwork equivalence with computations [J]. *Transportation Research Part E*, 2006, 42(4): 293–316.
- [26] Jenelius E, Petersen T, Mattsson L G. Road network vulnerability: Identifying important links and exposed regions [J]. *Transportation Research A*, 2006, 40(7): 537–560.
- [27] 周 晶. 随机交通均衡配流模型及其等价的变分不等式问题 [J]. *系统科学与数学*, 2003, 23(1): 120–127.
Zhou Jing. Stochastic user equilibrium and its variational inequality problem [J]. *Journal of System Science & Mathematical Sciences*, 2003, 23(1): 120–127. (in Chinese)
- [28] 徐红利, 周 晶, 徐 薇. 基于累积前景理论的随机网络用户均衡模型 [J]. *管理科学学报*, 2011, 14(7): 1–7, 54.
Xu Hongli, Zhou Jing, Xu Wei. Cumulative prospect theory-based user equilibrium model for stochastic network [J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2011, 14(7): 1–7, 54. (in Chinese)

Super-network model of urban agglomeration emergency coordination considering decision preferences

CAO Jie^{1 2}, ZHU Li^{1 2}

1. Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China;
2. School of Economics and Management, Nanjing University of Information Science Technology, Nanjing 210044, China

Abstract: A multi-tiered urban agglomeration emergency super-network model, constituted by retrieval depots, transit points and disaster-affected areas, is proposed in this paper against intercity disaster or resource limitation in a single city. The system-optimization goal of the model is established in terms of emergency time and cost. Stochastic choice in multiple emergency modes is studied based upon the stochastic user equilibrium assignment theory. The optimization goal and the stochastic choice problem are transformed into equivalent variational inequalities, respectively. By performing a numerical simulation and a computational solution, the feasibility and effectiveness of the model are demonstrated, in which key factors are analyzed for the decision-making practice.

Key words: emergency; coordination; urban agglomeration; stochastic choice; variational inequality