

基于联防联控机制的反恐资源配置序贯博弈模型

柴瑞瑞¹, 刘德海², 李 纲¹

(1. 华北水利水电大学管理与经济学院, 河南 郑州 450046;

2. 东北财经大学公共管理学院, 辽宁 大连 116025)

摘要: 针对新时期反恐袭击事件具有的袭击软目标、个人极端化行为等非常规边界特征, 引入攻防的空间拓扑关系量化政府防御盲区, 构建了政府反恐力量、暴恐分子和社会公众的序贯博弈模型, 分析了不同情景下政民联防联控机制的作用机理与关键影响因素。研究表明, 随着政民联防联控范围和目标价值变化, 社会公众参与努力水平存在最高临界值; 政民联防联控中社会公众努力水平和政府反恐资源配置量表现出动态协作的增减互补关系; 政府部门可从提升其防御收益成本特性和降低社会公众承担损失比例两个可控制层面有效防控暴恐威胁。

关键词: 暴恐袭击; 序贯博弈; 联防联控; 反恐资源配置

中图分类号: C931 文献标识码: A 文章编号: 1000-5781(2023)05-0678-14

doi: 10.13383/j.cnki.jse.2023.05.008

Sequential game model of anti-terrorism resource allocation based on joint prevention and control

Chai Ruirui¹, Liu Dehai², Li Gang¹

(1. School of Management and Economics, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China;

2. School of Public Administration, Dongbei University of Finance and Economics, Dalian 116025, China)

Abstract: Considering the unconventional characteristics of terrorist attacks in the new era, such as attacking soft targets and radicalizing individuals, the spatial topological relationship between offense and defense is introduced to quantify the government defense gap. A sequential game model of resource allocation involving the government, the terrorists and the participating citizens is constructed. Furthermore, the mechanism and influence factors of joint prevention and control mechanism under different scenarios are analyzed. The results show that there exists a maximum value for the citizens' efforts as the scope of joint prevention and control and the target value change. There is a complementary increase and decrease for the dynamic cooperative between the citizens' efforts and the government's resource allocation in the joint prevention and control. The government could effectively prevent and control violent terrorist threats from two aspects: Improving the benefit-cost of defense and reducing the proportion of losses borne by the public.

Key words: terrorist attacks; sequential game theory; joint prevention and control; anti-terrorist resources allocation

1 引言

当前国际恐怖活动出现“碎片化”和“独狼化”趋势, 我国海外合作项目及人员安全屡遭恐怖威胁, 加之我国新疆境内的恐怖主义、极端宗教势力和民族分裂势力与国外反华敌对势力相勾结, 仍然对国家统一、

收稿日期: 2021-04-20; 修订日期: 2021-11-04.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(72101236; 71874024; 72274030); 教育部人文社会科学基金资助项目(22YJC63-0002); 河南省高等学校哲学社会科学创新团队建设计划资助项目(2024-CXTD-10); 华北水利大学高层次人才科研启动资助项目(202010005).

民族团结、社会稳定造成了严重威胁, 恐怖袭击依然是影响我国构建大安全格局的重大安全风险威胁^[1]. 特别地, 恐怖活动袭击目标从党政机关人员和军事设施转向防范相对薄弱的公共场所等“软目标”, 例如 2014-03-01 昆明火车站恐怖袭击案、2016-08-30 我国驻吉尔吉斯斯坦使馆的恐怖袭击、2019-06-01 香港修例风波下激进暴力犯罪活动以及 2021-07-14 中企通勤车爆炸案. 新时期恐怖袭击事件具有袭击软目标、个人极端化行为、难以预测的高度突发性和决策时间紧迫性等复杂性的非常规边界特征, 造成了政府部门防御安全盲区. 因此, 在反恐实践中, 美国、英国、新加坡和俄罗斯等国家政府相继推行社会公众广泛参与的“全民反恐”战略^[2]. 我国《反恐怖主义法》也提出坚持“专门工作与群众路线相结合”的基本原则, 构建公众普遍参与的联防联控反恐新模式. 因此, 为了弥补政府部门反恐资源的有限性, 引入社会公众参与反恐, 在政民联防联控问题中考虑应急反恐资源优化配置尤为重要.

自从 2001 年美国 9·11 事件和 2009 年新疆 7·5 事件以后, 国内外研究学者针对应急反恐问题展开了丰富的研究. 从数理建模角度出发, 现有学者运用博弈论建模或目标规划方法, 多集中于研究袭击事件发生时间预测^[3]、暴恐分子袭击目标和袭击方式动态调整^[4]、政府反恐应急设施选址^[5-7]、应急反恐资源配置^[8-11]和反恐交通网络设计^[12]等问题研究. 该类研究的研究背景是暴恐分子与政府反恐力量的互动行为. Liang 等^[13]、Bakshi 等^[14]和 Baron 等^[15]的研究忽略了社会公众参与应急反恐作用. 徐选华等^[16]从社会公众参与角度进行了相应研究. Jain 等^[17]局限于社会公众在反恐中的作用或被动地接受政府的防御和警告; Wei 等^[18]假定社会公众受过度情绪驱使, 成为暴恐分子的潜在的非理性的追随者. 然而, 在反恐实践中, 根据中国北京市公安局统计, 2015 年名为“西城大妈”的群防群治组织提供涉恐线索达 72 条, 协助侦破涉恐案事件 128 件, 社会公众具有很强主观能动特征. 总体上来看, 现有文献关于反恐资源配置的研究主要集中在暴恐分子和政府部门双方博弈问题, 而针对具有主观能动性的社会公众参与反恐, 尤其是政民联防联控机制的研究尚未涉及.

Gupta 等^[19]指出, 暴恐分子在观察到政府反恐力量的防御部署策略后, 衡量袭击党政机关还是人群聚集场所等硬软目标的不同收益, 选择防御最薄弱甚至完全暴露的袭击目标发动攻击. 从空间拓扑关系上分析, 这体现为政府防御目标与袭击目标两者之间处于分离的状态. 关于反恐的空间拓扑关系分析, 现有研究集中在如下三个方面: (1) 根据恐怖袭击数据库资料, 付举磊等^[20]和宋楠等^[21]运用社会网络分析研究了恐怖分子的网络化结构特征; (2) 刘忠轶等^[22]考虑多个袭击目标间的空间位置分布特征, 探析了不同目标的最优防御范围和防御密度; (3) 柴瑞瑞等^[23]引入政府的防御范围与恐怖分子的袭击范围间空间拓扑关系, 解构了不同防御空间拓扑关系下政府反恐策略的演化机理. 而现有理论研究对于考虑攻防空间拓扑关系下, 社会公众参与的联防联控的反恐资源配置分析尚未涉及.

基于上述背景, 本文引入攻防的空间拓扑关系量化政府防御安全盲区, 构建以政府反恐力量为主导、暴恐分子和社会公众三方参与的反恐资源配置序贯博弈模型, 分析关键影响因素对政府部门和社会公众反恐决策的动态影响, 揭示社会公众参与的联防联控反恐的作用机理. 研究表明, 政民联防联控反恐模式下政府反恐资源配置量和社会公众参与努力水平呈现增减互补的动态协作关系, 为政府应急管理部门落实联防联控机制提供有力的抓手和理论支撑.

2 社会公众参与的反恐资源配置序贯博弈模型

2.1 问题描述

考虑政府对目标防御范围的有限性, 引入社会公众参与反恐, 分析政府应急反恐资源优化配置问题. 由于暴恐分子袭击软目标的新趋势和袭击事件的突发性特征, 造成政府部门防御存在盲区现象. 依据 Egenhofer 等^[24]提出的区域面空间拓扑关系, 引入空间拓扑关系刻画政府部门防控区域和暴恐分子袭击区域的防御盲区特性^[23]. 由于社会公众作为现场的第 1 响应者, 存在着两种可能的反应: 一种情境是, 按照《公民防暴反恐自救应急手册》, 社会公众可以采取相应的应对措施. 通过事前识别潜在可疑分子, 及时快速地向政府反恐部门提供暴恐袭击事件发生地点、时间等重要相关信息的情报预警能力, 以及在事中实施

自救互救确保安全下等待并配合政府应急反恐人员. 该情景对应于本研究中社会公众参与政府应急反恐的联防联控情景. 此时, 政府防控盲区范围转化为政民联防联控的范围. 另一种情境是, 社会公众出于本能保护丧失理性, 在恐慌情绪下一哄而逃, 成为完全被动的受害者, 具体表现为社会公众不参与的一种退化情景. 两种情景对应的参与方博弈示意图, 如图 1 所示.

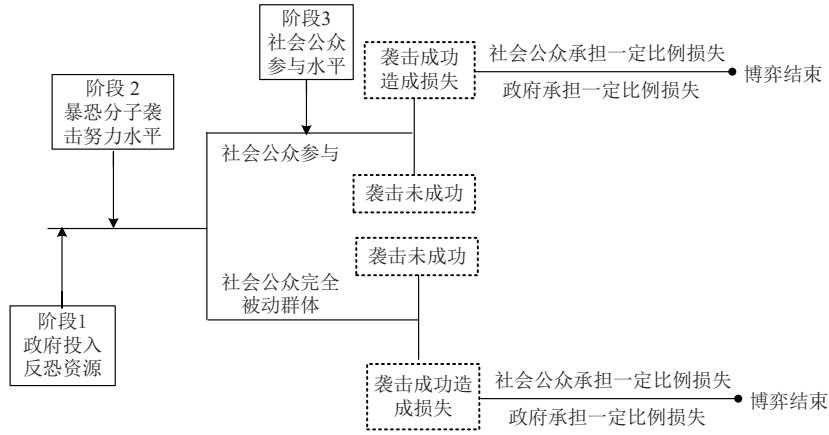


图 1 政府部门、社会公众和暴恐分子间博弈示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the game between the government, the citizens and the terrorists

在图 1 中, 首先, 政府作为先行者采取反恐资源配置决策. 其次, 暴恐分子选择袭击努力水平. 最后, 若社会公众积极参与, 作为追随者决定参与努力水平, 此时政府部门、暴恐分子和社会公众构成三方参与的序贯博弈模型; 若社会公众选择作为完全被动地受害者, 上述模型将退化为政府部门和暴恐分子间的序贯博弈模型. 其中, 社会公众是否参与影响着暴恐分子袭击成功概率的不同, 以及袭击成功造成损失中社会公众和政府部门承担损失, 具体差异详见 2.2 节.

2.2 符号说明

1) 空间拓扑关系. 设定暴恐分子袭击范围为 g , 政府部门严格防控范围为 f , 并用 $\otimes$ 表示 f 与 g 的重合关系. 由此, 政府有效防控范围 $w = f \otimes g$; 政府未有效防控范围, 即政府防控盲区范围为 $g - w$, 记为 n . 图 2 包含三种防御情景, 防御情景 1: 相切或相离关系. 政府有效防控范围 $w = 0$, 即 $f \otimes g = 0$, 如图 2(a) 所示. 此时政府防控盲区范围为 $n = g$, 即为完全盲区式防控. 防御情景 2: 相交关系或 f 包含于 g 关系. 政府严格防控范围和暴恐分子袭击范围存在一定程度重合特征, 或在政府有限防控范围下暴恐分子发动更广泛的袭击, 如图 2(b) 所示. 此时政府防控盲区范围为 $0 < n < g$, 即为部分有效防控. 防御情景 3: g 包含于 f 或 f 与 g 完全重合关系. 在政府广泛的防控范围内暴恐分子有选择的发动局部袭击, 如图 2(c) 所示. 此时政府防控盲区范围 $n = 0$, 即为精准防控. 假设整个范围标准化为 1, 得到政府防控范围 f 和暴恐分子袭击范围 g 满足 $0 < f \leq 1, 0 < g \leq 1$ 和 $0 < f + g \leq 1$. 假设被袭击目标 i 价值为 v_i , 其袭击造成的损失由社会公众和政府共同承担. 其中社会公众承担损失记为 $n(1 - \theta_i)v_i$, 例如生命健康损失. 政府承担损失为 $n\theta_i v_i$, 包括公共设施损失、经济损失以及带来的维稳成本. 具体符号定义如表 1 所示.

2) 目标类型. 硬目标和软目标两种目标类型区分的条件和标准在于社会公众集聚效应和政府防御成本差异^[25]. 其中相对于设计结构和使用功能相对封闭的硬目标, 软目标为大量社会公众聚集的公共场所, 其设计和使用具有高度开放性, 导致政府对其防御难度较大和防御成本过高. 基于此, 根据目标类型的概念界定给出其量化分类表述:

定义 1 (软目标) 给定暴恐分子袭击目标 $i, i \in \{1, 2, \dots, N\}$, 若社会公众承担袭击损失比例较大, 或政府部门需要付出的防御成本较大, 即满足 $\theta_i v_i / ((1 - \theta_i) v_i) < c_d$, 则被袭击目标 i 为软目标^[26].

定义 2 (硬目标) 若政府承担袭击损失比例较大或由于潜在袭击目标极易受到良好的保护而具有较低的政府防御成本, 即满足 $\theta_i v_i / ((1 - \theta_i) v_i) > c_d$, 则被袭击目标 i 为硬目标^[27].

值得注意的是, 软目标与硬目标间并不存在明显清晰而确定的界线, 两者只是相对而言, 甚至在某种条

件下可以进行转化. 比如针对人员密集的公共场所火车站、软目标的暴恐袭击增多, 政府通过增派警力安置点、升级安检技术与流程等措施强化对软目标的防护力度, 使软目标具备硬目标特征. 本研究中政府反恐资源配置和社会公众参与反恐是硬化软目标的过程.

表1 博弈模型中符号定义与说明

Table 1 Definition and description of variables and parameter of the model

符号	定义
参数	
v_i	被袭击目标 i 价值, $i \in \{1, 2, \dots, N\}$
g	暴恐分子袭击范围, $0 < g \leq 1$
f	政府部门有效防控范围, $0 < f \leq 1$
w	政府有效防控范围, 即政府严格防控范围与袭击范围交叉区域, $0 \leq w \leq \min\{f, g\}$
n	政府防控盲区范围, 满足 $n = g - w$, $0 \leq n \leq g$
$p_i(a_i, d_i, \gamma_i)$	暴恐分子成功袭击目标 i 的概率, $0 \leq p_i(a_i, d_i, \gamma_i) \leq 1$
θ_i	政府防控盲区范围内, 政府承担损失系数, $0 \leq \theta_i \leq 1$
$F_G(d_i)$	政府对目标 i 投入应急反恐资源成本, $F_G(d_i) \geq 0$
$F_P(\gamma_i)$	社会公众参与防护目标 i 的努力水平成本, $F_P(\gamma_i) \geq 0$
$F_T(a_i)$	暴恐分子袭击目标 i 的努力成本, $F_T(a_i) \geq 0$
β_d, β_γ	分别为政府应急反恐资源有效性, 社会公众投入努力水有效性, $\beta_d > 0, \beta_\gamma > 0$
c_d, c_a, c_γ	政府、暴恐分子和社会公众努力水平的成本系数, $c_d, c_a, c_\gamma > 0$
决策变量	
d_i	政府对目标 i 投入应急反恐资源量, $d_i \geq 0$
a_i	暴恐分子袭击目标 i 努力水平, $a_i \geq 0$
γ_i	社会公众参与防护目标 i 努力水平, $\gamma_i \geq 0$
目标函数	
U_G	政府的效用函数
U_T	暴恐分子的效用函数
U_P	社会公众的效用函数

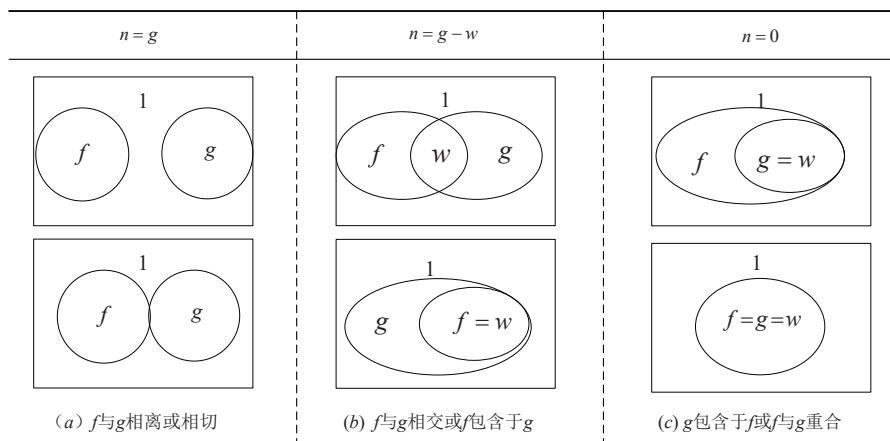


图2 政府严格防控范围与暴恐分子发动袭击范围空间拓扑特征关系

Fig. 2 The topological relationship between the government's control range and the attack range of terrorists

3) 袭击成功概率. 暴恐分子袭击目标的成功概率与政府是否有效防控有关, 其中在政府严格防控范围内暴恐分子袭击成功概率为零. 在政府防控盲区范围内, 暴恐分子袭击目标 i 的成功概率为 p_i . 该袭击成功概率受社会公众参与的影响. 一方面, 当社会公众选择参与和配合政府部门应对袭击事件, 目标 i 则由政府和社会公众共同努力防护. 其中政府防御行为用政府反恐投入资源 d_i 刻画, 主要包括公共机关、司法机关、国家安全机关、武警、军队以及投入的安防设备资源等; 社会公众参与由其参与努力水平 γ_i 刻画, 包括向政府部门提供重要的情报信息, 自防自救的能力, 以及与政府部门力量的协助反恐能力. 此时政府防控盲区 n 表现为政民联防联控的范围. 由此, 该范围内暴恐分子袭击目标 i 的成功概率 p_i , 即竞争成功函数, 依

赖于暴恐分子袭击努力水平 a_i , 政府反恐资源量 d_i 和社会公众的参与水平 γ_i . 假定袭击成功概率函数二阶可微, 其取值随着袭击努力水平增加而增大, 但增大幅度逐渐减小, 即满足 $\frac{\partial p_i(a_i, d_i, \gamma_i)}{\partial a_i} > 0$, $\frac{\partial^2 p_i(a_i, d_i, \gamma_i)}{\partial a_i^2} < 0$; 其取值与政府反恐资源量和社会公众参与水平具有负向关系, 且递减幅度随着政府和社会公众应对水平增加而减小, 即满足 $\frac{\partial p_i(a_i, d_i, \gamma_i)}{\partial d_i} < 0$, $\frac{\partial^2 p_i(a_i, d_i, \gamma_i)}{\partial d_i^2} > 0$ 和 $\frac{\partial p_i(a_i, d_i, \gamma_i)}{\partial \gamma_i} < 0$, $\frac{\partial^2 p_i(a_i, d_i, \gamma_i)}{\partial \gamma_i^2} > 0$. 特别地, 目标 i 被袭击的成功概率满足一定的边界条件. 一方面, 当暴恐分子不袭击目标 i , 则其被袭击成功概率为 0, 即 $p_i(a_i, d_i, \gamma_i)|_{a_i=0} = 0$. 另一方面, 当被袭击目标 i 未被政府和社会公众防御, 则暴恐分子袭击目标 i 的成功概率为 1, 即 $p_i(a_i, d_i, \gamma_i)|_{d_i=\gamma_i=0} = 1$. 基于文献[25], 本节给定目标 i 被袭击的成功概率函数为 $p_i(a_i, d_i, \gamma_i) = a_i / (a_i + \beta_d d_i + \beta_\gamma \gamma_i)$. 该袭击成功概率函数表明社会参与反恐有效降低了暴恐分子袭击成功可能性.

另一方面, 若社会公众选择作为不采取策略行为的被动群体, 即 $\gamma_i = 0$. 此时暴恐分子袭击目标 i 的成功概率取值依赖于政府承担损失部分和社会公众承担损失部分变化而不同. 在政府防控盲区下, 针对政府部门承担损失部分 $n\theta_i v_i$, 暴恐分子袭击目标 i 的成功概率退化为 $p_i(a_i, d_i, 0) = a_i / (a_i + \beta_d d_i)$. 另外, 对于由社会公众承担的剩余损失 $n(1 - \theta_i)v_i$, 政府部门反恐缺乏社会公众的协同努力, 导致政府防御资源对其防护有效性较低 β_d , 在这种情况下, 暴恐分子袭击目标 i 的成功概率退化为 1, 即 $\lim_{\beta_d \rightarrow 0} p_i(a_i, d_i, \gamma_i)|_{\gamma_i=0} = 1$.

2.3 模型构建

考虑到社会公众为完全被动群体, 即社会公众参与防护目标 i 的努力水平为零 $\gamma_i = 0$, 是政府部门防御、暴恐分子袭击和社会公众参与的三阶段博弈模型的一种退化情景. 本节将集中分析社会公众参与下的政民联防联控反恐模型构建.

第1阶段 政府防御资源决策. 作为先行行动者, 政府部门选择对目标的最优的防御资源. 当社会公众积极参与反恐, 政府承担的损失为 $n \sum_{i=1}^N p_i(a_i, d_i, \gamma_i) \theta_i v_i$. 对于不采取任何策略完全被动的社会公众, 此时政府承担的损失退化为 $n \sum_{i=1}^N p_i(a_i, d_i, 0) \theta_i v_i$.

当暴恐分子对潜在目标 i 袭击是完全成功局面, 为了减小不必要的投入成本, 政府部门选择完全放弃反恐资源配置. 相反地, 若暴恐分子对潜在目标具有较低的袭击成功概率时, 政府将选择投入更多反恐资源以实现更好的防控. 不失一般性, 政府反恐资源成本关于袭击成功概率是二阶可微的, 即满足 $\frac{\partial F_G(d_i)}{\partial p_i} < 0$, $\frac{\partial^2 F_G(d_i)}{\partial p_i^2} > 0$ 和 $F_G(d_i)|_{p_i=1} = 0$. 参照现有研究有关政府反恐事件的成本函数设定^[28], 给定政府对目标 i 投入反恐资源的成本函数为 $F_G(d_i) = -c_d \sum_{i=1}^N \ln p_i(a_i, d_i, \gamma_i)$.

第2阶段 暴恐分子袭击决策. 暴恐分子决策最优袭击努力水平以最大化袭击损失. 基于现有研究关于袭击损失的函数设定^[29], 当考虑社会公众参与反恐下, 给定恐怖袭击函数收益为 $n \sum_{i=1}^N p_i(a_i, d_i, \gamma_i) v_i$. 若社会公众为完全被动的受害者时, 暴恐分子袭击收益包含两部分. 第1部分是在政府反恐资源作用下, 由政府部门承担的损失 $n \sum_{i=1}^N p_i(a_i, d_i, 0) \theta_i v_i$, 另一部分是由完全被动的社会公众承担的损失为 $n \sum_{i=1}^N (1 - \theta_i) v_i$.

暴恐分子袭击成功直接依赖于袭击努力水平. 另外, 较高的政府反恐资源投入也会导致暴恐分子袭击成本的增加. 即从袭击成本角度出发, 袭击努力水平和政府反恐资源水平存在互补关系. 由于给定目标 i 下, 暴恐分子不确定目标周边及目标内的社会公众是否参与反恐行动以及其参与的努力程度. 由此给定暴恐分子袭击目标 i 成本函数为 $F_T(a_i) = c_a \sum_{i=1}^N a_i d_i$.

第3阶段 社会公众参与反恐. 该阶段中社会公众决定参与的最佳水平. 类似于上述讨论, 当社会公众积极参与反恐下, 其承担的袭击损失为 $n \sum_{i=1}^N p_i(a_i, d_i, \gamma_i) (1 - \theta_i) v_i$. 当社会公众为被动群体时, 其承担的损失为 $n \sum_{i=1}^N (1 - \theta_i) v_i$. 原因在于该情境下, 暴恐分子袭击目标 i 的成功概率为 1.

作为受害者的社会公众更关注自身防护的时间成本和经济成本. 作为后行动者的社会公众, 是难以事前精确判断有关政府反恐资源投入和暴恐分子袭击努力水平的信息. 因此, 社会公众参与努力成本只与自

身参与努力水平有关. 不失一般性, 借鉴现有研究关于投入努力水平成本函数^[30], 设定社会公众参与防护目标 i 的努力水平成本函数为 $F_P(\gamma_i) = c_\gamma \sum_{i=1}^N \gamma_i$.

依据图 1 描述的政府、社会公众和暴恐分子间的博弈过程, 构建三阶段博弈模型. 在第 3 阶段中, 社会公众基于政府反恐资源投入和暴恐分子袭击努力水平, 做出最大化效用的参与努力水平决策, 其中社会公众的预期效用等于其承担的袭击损失减去参与努力成本. 其效用最大化问题为

$$\max_{\gamma_i} U_P(a_i, d_i, \gamma_i) = -n \sum_{i=1}^N p_i(a_i, d_i, \gamma_i)(1 - \theta_i)v_i - F_P(\gamma_i). \quad (1)$$

在第 2 阶段中, 暴恐分子基于政府防御努力水平, 选择相应的袭击努力水平. 其预期收益函数为袭击效用减去袭击成本^[30]. 由于暴恐分子可以观察到社会公众的最优反应函数, 其效用最大化问题为

$$\max_{a_i} U_T(a_i, d_i, \hat{\gamma}_i(a_i, d_i)) = n \sum_{i=1}^N p_i(a_i, d_i, \hat{\gamma}_i(a_i, d_i))v_i - F_T(a_i), \quad (2)$$

其中 $\hat{\gamma}_i(a_i, d_i)$ 为社会公众的最优反应函数.

在第 1 阶段中, 政府预期收益为其承担的袭击损失减去防御成本. 依据社会公众和暴恐分子的最优反应函数, 其最优化问题为^[31]

$$\max_{d_i} U_G(\hat{a}_i(d_i), d_i, \hat{\gamma}_i(a_i, d_i)) = -n \sum_{i=1}^N p_i(\hat{a}_i(d_i), d_i, \hat{\gamma}_i(a_i, d_i))\theta_i v_i - F_G(d_i), \quad (3)$$

其中 $\hat{a}_i(d_i)$ 和 $\hat{\gamma}_i(a_i, d_i)$ 分别为暴恐分子和社会公众的最优反应函数.

3 均衡结果分析

3.1 社会公众积极参与下的反恐资源配置分析

依据效用函数式(1)~式(3), 运用逆向递推法, 求解出博弈模型的子博弈完美纳什均衡解. 首先, 求解作为最后行动者的社会公众的参与最优努力水平. 其次, 确定暴恐分子袭击最优努力水平. 最后, 计算政府反恐资源最优配置, 如命题 1 所示. 命题 1~命题 4 的具体证明过程见附录.

命题 1 考虑社会公众参与防护目标 i 的应急反恐, 三阶段动态博弈的子博弈完美纳什均衡解为

- 1) 政府应急反恐资源最优配置 $d_i^* = \frac{\theta_i v_i n c_\gamma}{2(1 - \theta_i) c_d \beta_\gamma c_a}$.
- 2) 暴恐分子袭击最优努力水平 $a_i^* = \frac{(1 - \theta_i) c_d^2 \beta_\gamma}{\theta_i^2 v_i n c_\gamma}$.
- 3) 社会公众参与最优努力水平 $r_i^* = \frac{(1 - \theta_i) c_d}{\theta_i c_\gamma} - \frac{(1 - \theta_i) c_d^2}{\theta_i^2 v_i n c_\gamma} - \frac{\theta_i v_i n c_\gamma \beta_d}{2(1 - \theta_i) c_d \beta_\gamma^2 c_a}$,

其中 $\gamma_i^* \geq 0$, 当且仅当 $\frac{(1 - \theta_i) c_d}{\theta_i} \geq \frac{n c_\gamma v_i}{\beta_\gamma} \sqrt{\frac{\theta_i \beta_d}{2 c_a (n \theta_i v_i - c_d)}}$.

由命题 1 可得, 社会公众参与防护目标 i 是需要满足一定的条件, 即 $\frac{(1 - \theta_i) c_d}{\theta_i} \geq \frac{n c_\gamma v_i}{\beta_\gamma} \sqrt{\frac{\theta_i \beta_d}{2 c_a (n \theta_i v_i - c_d)}}$. 第 1 层面为被袭击目标的软目标特征显著, 即超过一定临界值. 原因在于针对政府严格防范的硬目标设施袭击不成功. 第 2 层面为政府承担损失部分大于其防御成本, 即 $n \theta_i v_i > c_d$. 否则, 在政府完全放弃防御情况下, 单纯依靠社会公众的参与反恐收效甚微. 研究表明, 面对依然严峻的暴恐威胁, 联防联控是应急反恐防控的关键举措. 该举措在 2019 年新型冠状病毒肺炎疫情突发事件防控实践中得到了充分印证.

基于命题 1, 下文重点分析政民联防联控范围、目标价值和目标类型变化的不同情景下政府、暴恐分子和社会公众的最优决策动态变化. 具体分析如下.

首先, 分析政民联防联控范围 n 对参与方行为策略的动态影响. 由命题 1 可知, 随着政民联防联控范围 n 增加, 政府应急反恐资源最优配置增加, 暴恐分子袭击最优努力水平减小. 政民联防联控范围 n 对社会

公众参与最优水平如推论 1 所示.

推论 1 当政民联防联控范围小于临界值 $n < \bar{n}$ 时, 随着政民联防联控范围增加, 社会公众参与最优努力水平增加; 否则, 随着政民联防联控范围增加, 社会公众参与最优努力水平递减. 其中 $\bar{n} = \sqrt{\frac{2(1-\theta_i)^2 c_a c_d \beta_d^2}{\theta_i^3 v_i^2 c_\gamma^2 \beta_d}}$.

由推论 1 可知, 政民联防联控范围的不同, 社会公众参与最优努力水平呈不同的变化趋势. 当政民联防联控范围较小时 $n < \bar{n}$, 社会公众参与努力水平增加, 原因在于此时政府应急反恐资源配置量较小, 暴恐分子袭击努力水平较大, 社会公众需要提高自身努力水平, 提升政府有限反恐资源的针对性、精准性和有效性, 通过增加暴恐袭击成本强化软目标的防护力度. 随着政民联防联控范围进一步扩大, 社会公众参与努力水平降低, 原因在于此时政府部门加强了社会面控制, 例如升级硬质防撞设施, 扩大安装监控设备的防护网以捕捉反恐情报, 加强街面威慑和及早处置等应急措施, 对暴恐分子起到震慑效应. 随着政民联防联控区域范围变化, 社会公众参与努力水平存在一个最高临界值, 而且社会公众努力水平和政府反恐资源配置量表现出动态协作的增减互补关系.

其次, 由命题 1 可知, 随着目标价值 v_i 的增加, 政府应急资源的最优配置增加, 暴恐分子袭击努力水平减小. 目标价值 v_i 对社会公众参与努力水平的动态影响如推论 2 所示.

推论 2 当目标价值小于临界值 $v_i < \bar{v}_i$ 时, 随着目标价值增加, 社会公众参与最优努力水平增加; 否则, 随着目标价值增加, 社会公众参与最优努力水平递减. 其中 $\bar{v}_i = \frac{(1-\theta_i)\beta_\gamma c_d}{n\theta_i c_\gamma} \sqrt{\frac{2c_a c_d}{\theta_i \beta_d}}$.

由推论 2 可知, 当目标价值较小时 $v_i < \bar{v}_i$, 随着目标价值的增大, 社会公众参与努力水平增加. 原因在于具有较小价值的目标设施降低了政府反恐投入努力, 从而暴恐分子增加其努力程度以追求更高的袭击成功概率. 基于此, 社会公众需要增强参与努力水平与意识, 向政府部门提供可疑信息与线索报告, 提升政府应急反恐精细化和精准化, 有效预防和制止潜在暴恐活动. 随着目标价值进一步增大, 政府投入的应急资源增加, 降低了暴恐分子袭击努力水平, 此时社会公众可适当降低自身参与力度. 随着目标价值的变化, 社会公众参与努力水平存在一个最高临界值, 且社会公众努力水平和政府反恐资源配置量表现出动态协作的增减互补关系.

最后, 分析目标类型 $\theta_i / ((1-\theta_i)c_d)$ 对参与方行为策略的动态影响. 由命题 1 可知, 随着政府承担损失比例增加和单位反恐资源成本系数减小, 即满足硬目标定义 $\theta_i / (1-\theta_i) > c_d$, 政府应急反恐资源最优配置是增加的, 导致暴恐分子袭击最优努力水平下降, 社会公众参与最优努力水平减小. 例如, 实际中针对设计和使用功能相对封闭的硬目标防护, 政府采取了升级筛查甄别技术, 增加安保人员, 强化目标设施抗毁性能等防御措施. 相对应地, 由于暴恐分子对软目标设施袭击具有的全天候无终点, 随时突发特性, 造成单纯依靠政府防御部门难以有效对其进行安全防护. 即表现为政府应急资源投入力量较弱, 导致暴恐分子袭击努力水平增加, 由此社会公众需要增加参与努力水平增加, 以提升政府应急反恐的有效性.

综上所述, 随着政民联防联控区域范围、目标价值以及目标类型变化, 社会公众参与极有力地提升了政府对软目标防控有效性, 社会公众努力水平和政府反恐资源配置量表现出动态协作的增减互补关系. 在应对暴恐袭击事件中, 社会公众参与下政民协同反恐策略产生了 $1+1>2$ 的效应, 落实联防联控机制是新时期反恐模式的发展方向.

另外, 根据命题 1 中政府、社会公众和暴恐分子最优决策, 得到各自的最优效用值, 如命题 2 所示. 在求解参与方最优效用函数时, 考虑社会公众参与的情况, 即满足 $\frac{(1-\theta_i)c_d}{\theta_i} \geq \frac{n c_\gamma v_i}{\beta_\gamma} \sqrt{\frac{\theta_i \beta_d}{2 c_a (n \theta_i v_i - c_d)}}$ 和 $n \theta_i v_i > c_d$. 社会公众作为完全被动群体为一种退化特殊情况, 在 3.2 节中具体给出.

命题 2 考虑社会公众积极参与防护目标 i 的应急反恐:

$$1) \text{ 政府最优效用为 } U_G^* = \sum_{i=1}^N \left(-c_d + c_d \ln \frac{c_d}{n \theta_i v_i} \right).$$

$$2) \text{ 暴恐分子最优效用为 } U_T^* = \sum_{i=1}^N \frac{c_d}{2 \theta_i}.$$

$$3) \text{ 社会公众参与最优效用为 } U_P^* = \sum_{i=1}^N \left(\frac{(1-\theta_i)c_d^2}{n\theta_i^2v_i} + \frac{\theta_iv_in c_\gamma^2 \beta_d}{2(1-\theta_i)c_d \beta_\gamma^2 c_a} - \frac{2(1-\theta_i)c_d}{\theta_i} \right).$$

命题2结果表明政府最优效用随着其防御成本 c_d 和承担损失 $n\theta_iv_i$ 减少而递增; 政府防御成本 c_d 的增加和社会公众承担损失比例 $1-\theta_i$ 的减小, 增加了暴恐分子袭击效用; 社会公众参与最优效用受政府、暴恐分子以及自身参与收益成本特征的综合影响. 随着自身参与收益-成本系数 β_γ/c_γ 降低, 政府应急反恐资源有效性 β_d 增加以及暴恐分子袭击成本 c_a 降低, 其最优效用是增加的. 其中社会公众参与收益-成本的减少, 降低了其参与努力水平, 增加了政府反恐资源配置, 最终降低了暴恐分子袭击成功概率, 自身效用增加. 综上所述, 在政民联防联控反恐过程中, 政府可以从提升其防御收益-成本特性和降低社会公众承担损失比例两个可控制层面, 降低暴恐袭击造成的损失. 当社会公众参与的收益-成本减小时, 较低的社会公众参与水平通过提升政府应急反恐资源有效性和精准性是有效打击和防控潜在暴恐在暴恐威胁的关键所在. 另外, 目标价值、政民联防联控范围和政府防御成本对社会公众期望效用的影响具有非单调性的复杂关系, 其影响分析将在第4节案例分析中具体展开.

3.2 一种退化的情况: 完全被动的社会公众下反恐资源配置分析

本节考虑一种退化情景: 社会公众为完全被动群体, 即社会公众参与防护目标 i 的努力水平为零 $\gamma_i = 0$. 此时, 三阶段动态博弈退化为政府部门和暴恐分子间两方博弈模型. 对于完全被动的社会公众, 其预期收益函数退化为常数值情景, 即 $U_P = -n \sum_{i=1}^N (1-\theta_i)v_i$. 暴恐分子在观察到政府应急资源配置后, 做出最优袭击努力水平, 其效用最大化问题为

$$\text{Max}_{a_i} U_T(a_i, d_i) = n \sum_{i=1}^N p_i(a_i, d_i) \theta_i v_i + n \sum_{i=1}^N (1-\theta_i)v_i - c_a \sum_{i=1}^N a_i d_i. \quad (4)$$

社会公众完全被动下政府效用最大化问题为

$$\text{Max}_{d_i} U_G(d_i, \hat{a}_i(d_i)) = -n \sum_{i=1}^N p_i(d_i, \hat{a}_i(d_i)) \theta_i v_i + c_d \sum_{i=1}^N \ln p(d_i, \hat{a}_i(d_i)), \quad (5)$$

其中 $\hat{a}_i(d_i)$ 为暴恐分子的反应函数. 运用逆向递推法, 首先, 确定暴恐分子袭击努力水平; 然后, 求解政府应急反恐资源最优配置量. 政府与暴恐分子的最优策略如下.

命题3 社会公众为完全被动群体时, 政府和暴恐分子的序贯博弈的子博弈完美纳什均衡解为:

- 1) 当 $n\theta_iv_i < c_d$ 时, 暴恐分子最优袭击努力水平为 $a_i^* = a_i^{\max}$, 政府应急反恐资源最优配置 $d_i^* = 0$.
- 2) 当 $n\theta_iv_i > c_d$ 时, 暴恐分子最优袭击努力水平 $a_i^* = c_d \sqrt{\frac{\beta_d}{n\theta_iv_i c_a}}$, 政府应急反恐资源最优配置量为 $d_i^* = (n\theta_iv_i - c_d) \sqrt{\frac{1}{n\theta_iv_i \beta_d c_a}}$.

对于目标 i 满足 $n\theta_iv_i < c_d$, 即在暴恐分子袭击范围与政府防御范围存在一定偏差下, 相对于政府承担损失价值而言, 政府对其防御难度较大. 政府对软目标防御盲区与被动群体的社会公众, 共同导致政府防御和应对暴恐袭击事件处于完全失败的局面. 例如, 2014年昆明火车站袭击事件, 2017年拉斯维加斯枪机事件, 2017年巴基斯坦清真寺袭击事件等. 如推论3所示.

推论3 在政府存在部分防御盲区下, 社会公众的被动行为和政府应急资源配置短缺共同导致了完全失败的反恐局面.

推论3研究结果表明暴恐分子针对该类软目标的袭击事件中, 不仅需要政府配置应急反恐资源, 更需要社会公众积极参与协助反恐, 才能最大限度的降低袭击成功可能性. 另外, 在求解参与方最优效用函数时, 考虑到与社会公众参与情况结果可比性, 同样在 $\frac{(1-\theta_i)c_d}{\theta_i} \geq \frac{n c_\gamma v_i}{\beta_\gamma} \sqrt{\frac{\theta_i \beta_d}{2 c_a (n\theta_iv_i - c_d)}}$ 和 $n\theta_iv_i > c_d$ 的条件下, 根据命题3中政府和暴恐分子最优决策, 得到各自的最优效用值, 如命题4所示.

命题4 考虑社会公众被动群体下:

$$1) \text{ 政府最优效用为 } U_G^* = \sum_{i=1}^N \left(-c_d + c_d \ln \frac{c_d}{n\theta_iv_i} \right).$$

$$2) \text{ 暴恐分子最优效用为 } U_T = \sum_{i=1}^N \left(n(1 - \theta_i)v_i + \frac{c_d^2}{n\theta_i v_i} \right).$$

$$3) \text{ 社会公众参与最优效用 } U_P^* = \sum_{i=1}^N (-n(1 - \theta_i)v_i).$$

对比社会公众是否积极参与两种情景下博弈参与方的最优效用值的理论解, 得到政府最优效用是无差异的, 但是暴恐分子最优效用、社会公众最优效用差异取决于政府防控盲区范围、目标价值以及政府防御系数等重要参数, 具有非线性的复杂关系, 将在第 4 节案例分析中具体展开分析。

4 基于新疆墨玉县警民协同打击暴恐团伙的案例分析

为了进一步验证理论建模结果, 本节结合全球恐怖主义数据库 GTD¹ 和 2014 年新疆墨玉县警民联手围捕暴恐团伙事件数据进行案例分析, 提供更切合实际问题的参考。墨玉县位于沙漠边缘, 是新疆人口第 2 大县, 是反恐的前沿阵地。在 2014 年 7 月新疆墨玉县开展严打暴恐活动专项行动中, 暴恐团伙在墨玉县乡镇多处流窜、多处作案方式, 给政府追捕暴恐分子带来了一定程度困难。在此情境下, 墨玉县 7 个乡镇 180 个村共计 3 万以上群众主动参与, 8 月 1 日政民协同联手成功摧毁暴恐团伙。由此政府承担损失系数可设定为 0.5, 即 $\theta_i = 0.5$ 。根据聚汇数据网平台统计², 2013 年墨玉县 GDP 增长额为 4.63 亿元。从和平发展的红利视角出发, 控制暴恐分子反恐收益为 4.63 亿元。由此, 在政民协同打击下, 政府应急反恐资源有效性和社会公众参与努力水平有效性可设定为 $\beta_\gamma = \beta_d = 23\ 150$ 万元。运用机会成本思维, 若暴恐分子发送袭击成功将导致公共安全和社会资源财富损失, 即袭击目标价值 $v_i = 46\ 300$ 万元。《人力资源蓝皮书: 中国人力资源发展报告(2013)》显示, 北京和新疆的最低小时工资标准最高, 为 15.2 元。由此可知, 新疆最低日工资标准为 121.6 元, 得到 3 万民众参与围捕的单位努力水平成本为 364.8 万元, 即 $c_\gamma = 364.8$ 万元。据新华网 2014-08-04 报道, 新疆维吾尔自治区投资 3 亿余元奖励参与围捕专项行动的群众及相关人员。与社会公众的单位努力成本计算维度保持一致, 计算得到政府投入单位努力水平成本 $c_d = 1\ 000$ 万元。2004 年 8 月份, 联合国发表报告指出, 2001 年 9·11 恐怖袭击后, 恐怖分子在制造任何规模较大的恐怖袭击, 包括巴厘岛爆炸案、马德里爆炸案及伊斯坦布尔大爆炸等, 成本均未超过 5 万美元。由此考虑汇率因素下, 计算得到暴恐分子单位袭击努力水平成本为 $c_a = 30.75$ 万元。

根据全球恐怖主义数据库 GTD 统计出 1989 年~2019 年我国暴恐袭击软硬目标类型的次数。其中假定硬目标代表政府防控范围, 软目标代表政府未防控范围, 政府严格防控范围为袭击硬目标次数与袭击软硬目标类型次数比值, 未得到政府有效防控范围为袭击软目标次数与袭击软硬目标类型次数比值, 两者之和为暴恐分子袭击范围。即政府严格防控范围为 $f = 0.34$, 即有效防控范围 $w = 0.34$, 暴恐分子袭击范围为 $g = 1$ 。政府对潜在目标防控的盲区范围为 $n = g - w = 0.66$ 。上述案例参数取值满足社会公众参与条件 $\frac{(1-\theta_i)c_d}{\theta_i} \geq \frac{nc_\gamma v_i}{\beta_\gamma} \sqrt{\frac{\theta_i \beta_d}{2c_a(n\theta_i v_i - c_d)}}$ 和 $n\theta_i v_i > c_d$, 如命题 1 所示。为了对理论分析结果命题 1~ 命题 4 及相关推论进行案例验证, 依次讨论政民联防联控范围、目标价值以及目标类型变化下, 社会公众参与反恐的效果, 即对比分析社会公众是否参与下社会和暴恐分子效用差异, 是对命题 2 和命题 4 理论结果的案例验证。其中社会效用为政府部门和社会公众的效用的加总。另外, 鉴于篇幅问题, 关于政府、暴恐分子以及社会公众的最优决策(如命题 1 以及相关推论所示)的案例验证在附录中呈现。

情景 1 政民联防联控范围 n 变化。由于社会公众参与需要满足的条件 $\frac{(1-\theta_i)c_d}{\theta_i} \geq \frac{nc_\gamma v_i}{\beta_\gamma} \sqrt{\frac{\theta_i \beta_d}{2c_a(n\theta_i v_i - c_d)}}$ 和 $n\theta_i v_i > c_d$, 依据案例参数取值, 政府联防联控范围围绕 0.66 上下波动, 取值区间 $n \in (0.043, 1]$ 。将案例参数代入命题 2 和命题 4 博弈方的效用函数中, 得到社会公众是否参与下社会和暴恐分子效用差异如图 3 所示。

图 3 表明当社会公众为完全被动群体, 暴恐分子发动袭击有利可图。具体地, 相对于社会公众参与情景,

¹<https://www.start.umd.edu/gtd/>

²<https://gdp.gotohui.com/data-3142>

该情景下社会效用是降低的. 两种情境下社会和暴恐分子的效用差异性将随着政民联防联控范围的增加而急剧增加. 尤其对于存在较大的政府防控盲区, 社会公众通过提供应急反恐情报或实施自救参与政府应急反恐具有极大的正向效应. 该案例分析结果为命题 2 的理论结论提供了更丰富的细节. 另外, 社会公众参与水平和政府应急资源配置如何随着政民联防联控范围变动, 在附录中具体给出, 在此不再赘述.

情景 2 目标价值 v_i 变化. 当目标价值变化时, 基于案例参数取值, 由社会公众参与需要满足的条件 $\frac{(1-\theta_i)c_d}{\theta_i} \geq \frac{nc_\gamma v_i}{\beta_\gamma} \sqrt{\frac{\theta_i \beta_d}{2c_a(n\theta_i v_i - c_d)}}$ 和 $n\theta_i v_i > c_d$, 得到目标价值的下界为 $v_i = 3\ 030$. 另外, 目标价值的上界取值对分析结果不产生任何影响. 由此, 该节给定其变动区间 $v_i \in (3\ 030, 46\ 300]$. 将案例参数代入命题 2 和命题 4 博弈方的效用函数中, 得到社会公众是否参与下社会和暴恐分子效用差异如图 4 所示.

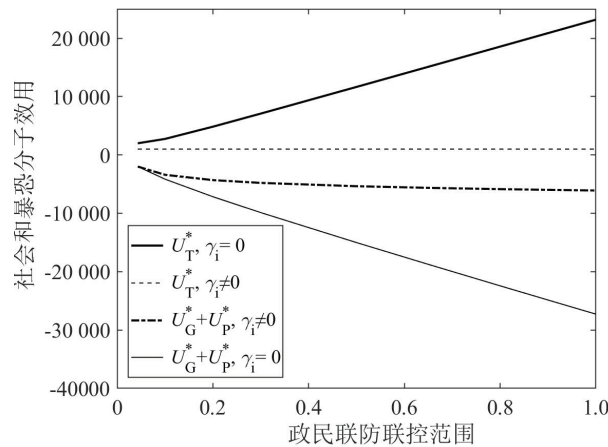


图 3 政民联防联控范围变动下, 社会公众参与对社会和暴恐分子效用影响

Fig. 3 The influence of citizens' participation on the utilities of society and terrorists with the scope of joint prevention and control changes

图 4 表明目标价值的增加增强了社会公众参与反恐的有效性. 其中社会效益的增加在于社会公众的参与极大降低了自身遭受的损失, 如命题 2 和 命题 4 所示. 由此, 防御目标存在安全盲区下, 针对目标价值较大的设施, 社会公众的参与是决定反恐行动的效果关键所在. 另外, 社会公众参与水平和政府应急资源配置如何随着目标价值变动, 在附录中具体给出, 在此不再赘述.

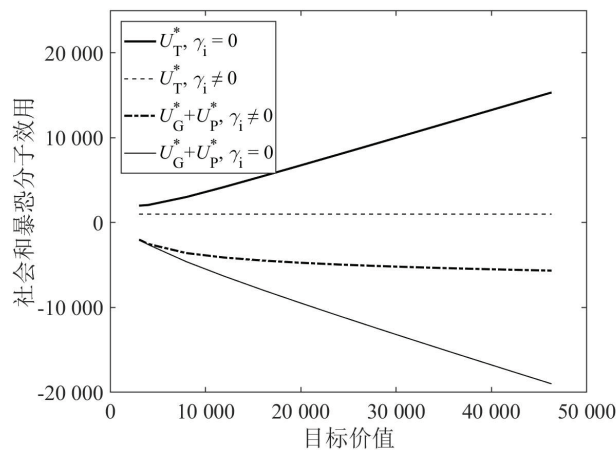


图 4 目标价值变动下, 社会公众参与对社会和暴恐分子效用影响

Fig. 4 The influence of citizens' participation on the utilities of society and terrorists with target value changes

情景 3 目标类型 $\theta_i/(1-\theta_i)$, c_d 变化. 当目标类型变化时, 首先, 根据 $\theta_i/(1-\theta_i) < c_d$ 和 $\theta_i/(1-\theta_i) > c_d$ 对应的两种目标类型和社会公众参与需要满足的条件 $\frac{(1-\theta_i)c_d}{\theta_i} \geq \frac{nc_\gamma v_i}{\beta_\gamma} \sqrt{\frac{\theta_i \beta_d}{2c_a(n\theta_i v_i - c_d)}}$ 和 $n\theta_i v_i > c_d$, 设定政府承担损失系数 $\theta_i = 0.4$. 在此基础上, 政府防御成本系数的区间范围为 $c_d \in (35.7, 12\ 223]$, 满足条件 $\theta_i/(1-\theta_i) < c_d$, 即被袭击目标更多的倾向于软目标特征. 将案例参数代入命题 2 和命题 4 博弈方的效用函数中, 得到社会公众是否参与下社会和暴恐分子效用差异如图 5 所示.

图5表明社会公众参与对袭击事件的效果影响依赖于政府防御成本系数. 当政府防御成本较低时, 社会公众参与极大的降低了暴恐分子袭击收益, 同时提升了社会总效用. 随着政府防御成本的增加, 社会公众参与尽管对社会效用提升效果递减, 但极大的降低了暴恐分子袭击效用. 原因在于, 社会公众的参与增强了暴恐分子的袭击成本. 由此, 存在政府防控盲区下, 社会公众参与对软目标类型目标设施具有积极的正效应.

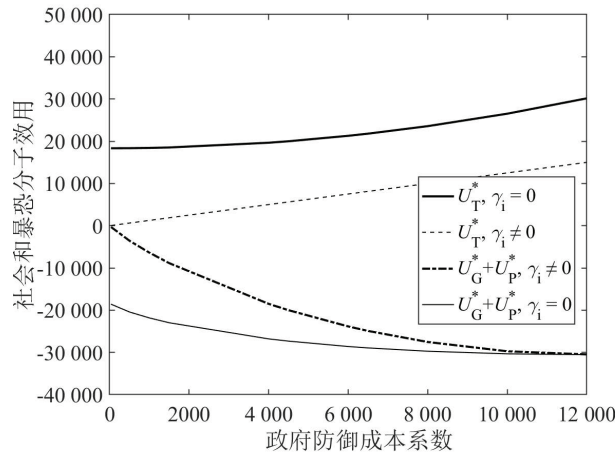


图5 政府防御成本系数变动下, 社会公众参与对社会和暴恐分子效用影响

Fig. 5 The influence of citizens' participation on the utilities of society and terrorists with government defense costs change

5 结束语

为了应对恐怖袭击转向软目标的潜在威胁, 充分动员社会公众普遍参与, 本文引入攻防空间拓扑关系量化了政府防御安全盲区, 构建了政民联防联控的反恐资源配置序贯博弈模型, 揭示不同影响因素对社会公众参与和政府应急反恐力量联防联控的动态影响. 结果表明: 相对于完全被动情景, 社会公众参与提升了政府防御的精准性和有效性; 政府部门从提升其防御收益-成本特性和降低社会公众承担损失比例两个可控制层面, 可有效降低暴恐袭击造成的损失. 基于此, 政府部门通过构建公众普遍参与反恐达成提前预防和精确打击. 由于政府和社会公众行为决策和行为时时刻刻影响着反恐决策和反恐效果状态, 表现出长期化特征, 未来可以进一步考虑基于微分博弈的反恐联动激励补偿研究.

参考文献:

- [1] Potter P B K, Wang C. Governmental responses to terrorism in autocracies: Evidence from China. *British Journal of Political Science*, 2022, 52(1): 358–380.
- [2] Kurwa R. Building the digitally gated community: The case of Next-door. *Surveillance and Society*, 2019, 17(1): 111–117.
- [3] 罗澜峻, 祁超, 王红卫, 等. 基于 LSTM 模型的恐怖袭击事件发生时间预测. *系统工程学报*, 2020, 35(2): 163–172.
Luo L J, Qi C, Wang H W, et. al. Prediction of terrorist attack events time based on LSTM model. *Journal of Systems Engineering*, 2020, 35(2): 163–172. (in Chinese)
- [4] Jaspersen J G, Montibeller G. On the learning patterns and adaptive behavior of terrorist organizations. *European Journal of Operational Research*, 2020, 282(1): 221–234.
- [5] 项寅. 考虑信息隐藏策略的反恐应急设施选址模型. *系统工程理论与实践*, 2019, 39(5): 1164–1177.
Xiang Y. Optimization model of terror response facility location with hidden information. *System Engineering: Theory & Practice*, 2019, 39(5): 1164–1177. (in Chinese)
- [6] 韩传峰, 孟令鹏, 张超, 等. 基于完全信息动态博弈的反恐设施选址模型. *系统工程理论与实践*, 2012, 32(2): 366–372.
Han C F, Meng L P, Zhang C, et al. Location of terror response facilities based on dynamic game of complete information. *System Engineering: Theory & Practice*, 2012, 32(2): 366–372. (in Chinese)
- [7] Feng Q, Cai H, Chen Z. Using game theory to optimize the allocation of defensive resources on a city scale to protect chemical facilities against multiple types of attackers. *Reliability Engineering and System Safety*, 2019, 191: 1–11.

- [8] 王 雷, 王 欣, 赵秋红, 等. 多地点协同恐怖袭击下的多目标警务应急物流调度. 系统工程理论与实践, 2017, 37(10): 2680–2689.
Wang L, Wang X, Zhao Q H, et al. Multi-objective policing emergency logistics scheduling on multi-location coordinated terrorist attacks. *System Engineering: Theory & Practice*, 2017, 37(10): 2680–2689. (in Chinese)
- [9] 宋 艳, 滕辰妹. 基于现存设施布局的设施选址: 应对恐怖袭击. 运筹与管理, 2019, 28(10): 5–12.
Song Y, Teng C M. Facility location under existing facilities: Responses to terrorist attacks. *Operations Research and Management Science*, 2019, 28(10): 5–12. (in Chinese)
- [10] Hunt K, Agarwal P, Zhuang J. Technology adoption for airport security: Modeling public disclosure and secrecy in an attacker-defender game. *Reliability Engineering and System Safety*, 2021, 207: 1–15.
- [11] 柴瑞瑞, 刘德海, 陈静锋. 恐怖分子跨国潜入的反恐安检资源配置研究. 系统工程学报, 2017, 32(3): 335–345.
Chai R R, Liu D H, Chen J F. Study of anti-terrorism security resource allocation in transnational terrorism. *Journal of Systems Engineering*, 2017, 32(3): 335–345. (in Chinese)
- [12] 项 寅. 模糊环境下边境反恐交通网络设计模型及应用. 中国管理科学, 2021, 29(11): 237–248.
Xiang Y. Optimal model and application for terrorist interdiction network design under fuzzy environment. *Chinese Journal of Management Science*, 2021, 29(11): 237–248. (in Chinese)
- [13] Liang L, Chen J, Siqueira K. Revenge or continued attack and defense in defender-attacker conflicts. *European Journal of Operational Research*, 2020, 287(3): 1180–1190.
- [14] Bakshi N, Pinker E. Public warnings in counterterrorism operations: managing the “Cry-Wolf” effect when facing a strategic adversary. *Operations Research*, 2018, 66(4): 977–993.
- [15] Baron O, Berman O, Gavious A. A game between a terrorist and a passive defender. *Production and Operations Management*, 2018, 27(3): 433–457.
- [16] 徐选华, 王麟麟, 陈晓红. 公众关注主题下的大群体风险性应急决策方法. 系统工程学报, 2019, 34(4): 511–525.
Xu X H, Wagn L L, Chen X H. Large group risky emergency decision-making under the public concern themes. *Journal of Systems Engineering*, 2019, 34(4): 511–525. (in Chinese)
- [17] Jain S, Mukand S W. The economics of high-visibility terrorism. *European Journal of Political Economy*, 2004, 480(20): 479–494.
- [18] Wei M, Chen G, Cruz J B, et al. Game-theoretic modeling and control of military operations with partially emotional civilian players. *Decision Support Systems*, 2008, 44(3): 565–579.
- [19] Gupta S, Starr M K, Farahani R Z, et al. Prevention of terrorism-an assessment of prior POM work and future potentials. *Production and Operations Management*, 2020, 29(7): 1789–1815.
- [20] 付举磊, 肖 进, 孙多勇, 等. 基于社会网络的恐怖活动时空特征分析. 系统工程理论与实践, 2015, 35(9): 2324–2332.
Fu J L, Xiao J, Sun D Y, et al. Spatial-temporal characteristics analysis of terrorist activities based on social network analysis. *System Engineering: Theory & Practice*, 2015, 35(9): 2324–2332. (in Chinese)
- [21] 宋 楠, 付举磊, 鲍 勤, 等. 基于无标度网络的恐怖信息传播与最优应对策略. 系统工程理论与实践, 2015, 35(3): 630–640.
Sun N, Fu J L, Bao Q, et al. Cyber terrorism spreading and optimal intervention policies based on a scale-free network. *System Engineering: Theory & Practice*, 2015, 35(3): 630–640. (in Chinese)
- [22] 刘忠轶, 翟 昕, 高 岩, 等. 考虑空间因素的反恐防御竞争分析. 系统工程理论与实践, 2016, 36(1): 136–144.
Liu Z Y, Zhai X, Gao Y, et al. Competitive analysis of anti-terrorism defense considering spatial factors. *System Engineering: Theory & Practice*, 2016, 36(1): 136–144. (in Chinese)
- [23] 柴瑞瑞, 刘德海, 陈静锋, 等. 考虑防御拓扑特征的暴恐事件演化博弈模型和仿真分析. 运筹与管理, 2017, 26(5): 28–36.
Chai R R, Liu D H, Chen J F, et al. Evolutionary game model and simulation analysis of terrorist incidents considering defense topological characteristic. *Operations Research and Management Science*, 2017, 26(5): 28–36. (in Chinese)
- [24] Egenhofer M J, Franzosa R D. Point-set topological spatial relations. *International Journal of Geographical Information Systems*, 1991, 5(2): 161–174.
- [25] Bennett B T. *Understanding, Assessing, and Responding to Terrorism: Protecting Critical Infrastructure and Personne*. Hoboken: John Wiley & Sons, 2007.
- [26] Hesterman J. *Soft Target Hardening*. <https://doi.org/10.4324/9780429422966>, New York: Routledge, 2019.
- [27] Martin R H. Soft targets are easy terror targets: increased frequency of attacks, practical preparation, and prevention. *Forensic Research & Criminology International Journal*, 2016, 3(2): 1–7.
- [28] Peng R, Levitin G, Xie M, et al. Defending simple series and parallel systems with imperfect false targets. *Reliability Engineering & System Safety*, 2010, 95(6): 679–688.
- [29] Bier V, Oliveros S, Samuelson L. Choosing what to protect: Strategic defensive allocation against an unknown attacker. *Journal of Public Economic Theory*, 2007, 9(4): 563–587.

- [30] Zhuang J, Bier V M. Balancing terrorism and natural disasters-defensive strategy with endogenous attacker effort. *Operations Research*, 2007, 55(5): 976–991.
- [31] Major J A. Advanced techniques for modeling terrorism risk. *Journal of Risk Finance*, 2002, 4(1): 15–24.

作者简介:

柴瑞瑞(1989—), 女, 河南濮阳人, 博士, 讲师, 研究方向: 突发事件应急管理, Email: chairuirui2013@126.com;
 刘德海(1974—), 男, 辽宁辽阳人, 博士, 教授, 研究方向: 突发事件应急管理, Email: ldhai2001@163.com;
 李 纲(1977—), 男, 河南南阳人, 博士, 教授, 研究方向: 创新与创业管理, Email: ligang0840907@163.com.

附 录

命题 1 和命题 2 证明 采用逆向归纳法, 对效用函数(1)关于社会公众参与水平求一阶偏导数

$$\frac{\partial U_P(a_i, d_i, \gamma_i)}{\partial \gamma_i} = \frac{\beta_\gamma(1-\theta_i)v_i a_i n}{(a_i + \beta_d d_i + \beta_\gamma \gamma_i)^2} - c_\gamma.$$

令一阶偏导数 $\frac{\partial U_P(a_i, d_i, \gamma_i)}{\partial \gamma_i} = 0$, 得到社会公众参与防护目标 i 的努力水平的反应函数

$$\hat{\gamma}_i(a_i, d_i) = \sqrt{\frac{(1-\theta_i)v_i a_i n}{\beta_\gamma c_\gamma}} - \frac{a_i + \beta_d d_i}{\beta_\gamma}.$$

其次, 决定暴恐分子最优袭击努力水平. 将社会公众参与反应函数 $\hat{\gamma}_i(a_i, d_i)$ 代入到恐怖分子效用函数(2)中, 关于暴恐分子袭击努力水平求一阶偏导数

$$\frac{\partial U_T(a_i, d_i, \hat{\gamma}_i(a_i, d_i))}{\partial a_i} = \sqrt{\frac{c_\gamma v_i n}{\beta_\gamma(1-\theta_i)}} - \frac{1}{2\sqrt{a_i}}.$$

令一阶偏导数 $\frac{\partial U_T(a_i, d_i, \hat{\gamma}_i(a_i, d_i))}{\partial a_i} = 0$, 得到暴恐分子袭击目标 i 的努力水平的反应函数

$$\hat{a}_i(d_i) = \frac{c_\gamma v_i n}{4(1-\theta_i)\beta_\gamma c_a^2 d_i^2}.$$

最后, 确定政府应急反恐资源最优投入量. 将社会公众和暴恐分子最优反应函数 $\hat{\gamma}_i(a_i, d_i)$, $\hat{a}_i(d_i)$ 代入到政府效用函数(3)中, 关于政府应急反恐资源求一阶导

$$\frac{\partial U_G(\hat{a}_i(d_i), d_i, \hat{\gamma}_i(a_i, d_i))}{\partial d_i} = \frac{2\beta_\gamma(1-\theta_i)c_d d_i}{c_\gamma} - n\theta_i v_i.$$

令一阶偏导数 $\frac{\partial U_G(\hat{a}_i(d_i), d_i, \hat{\gamma}_i(a_i, d_i))}{\partial d_i} = 0$, 得到政府对目标 i 投入的应急资源最优配置量

$$d_i^* = \frac{\theta_i v_i n c_\gamma}{2(1-\theta_i)c_d \beta_\gamma c_a}.$$

将政府应急反恐资源最优配置 d_i^* 依次代入到暴恐分子和社会公众的反应函数 $\hat{a}_i(d_i)$, $\hat{\gamma}_i(a_i, d_i)$ 中, 得到暴恐分子袭击最优努力水平和社会公众参与最优努力水平

$$a_i^* = \frac{(1-\theta_i)c_d^2 \beta_\gamma}{\theta_i^2 v_i n c_\gamma}, \quad r_i^* = \frac{(1-\theta_i)c_d}{\theta_i c_\gamma} - \frac{(1-\theta_i)c_d^2}{\theta_i^2 v_i n c_\gamma} - \frac{\theta_i v_i n c_\gamma \beta_d}{2(1-\theta_i)c_d \beta_\gamma^2 c_a}.$$

将政府部门、暴恐分子和社会公众的最优决策代入效用函数式(1)~式(3)中, 得到三方的最优效用分别为

$$U_G^* = \sum_{i=1}^N \left(-c_d + c_d \ln \frac{c_d}{n\theta_i v_i} \right), \quad U_T^* = \sum_{i=1}^N \frac{c_d}{2\theta_i}, \quad U_P^* = \sum_{i=1}^N \left(\frac{(1-\theta_i)c_d^2}{n\theta_i^2 v_i} + \frac{\theta_i v_i n c_\gamma^2 \beta_d}{2(1-\theta_i)c_d \beta_\gamma^2 c_a} - \frac{2(1-\theta_i)c_d}{\theta_i} \right).$$

证毕.

命题 3 和命题 4 证明 证明过程同命题 1 和命题 2. 当社会公众为被动群体情境下, 首先决策恐怖分子最优袭击努力水平. 通过对效用函数(4)关于暴恐分子袭击努力水平求一阶偏导数, 令一阶偏导数等于零, 得到暴恐分子最优反应函数

$$\hat{a}_i(d_i) = \sqrt{\frac{\beta_d \theta_i v_i n}{c_a}} - \beta_d d_i.$$

其次, 求解政府应急反恐资源最优配置. 将暴恐分子反应函数 $\hat{a}_i(d_i)$ 代入到政府预期收益函数(5)中, 对政府应急反恐资源配置求一阶导, 并令一阶导数等于零, 求解政府应急反恐资源最优配置

$$d_i^* = \begin{cases} 0, & \theta_i v_i n < c_d \\ \sqrt{\frac{(\theta_i v_i n - c_d)^2}{\theta_i v_i \beta_d c_a n}}, & \theta_i v_i n > c_d. \end{cases}$$

将政府应急反恐资源最优配置代入暴恐分子的反应函数 $\hat{a}_i(d_i)$ 中, 得到暴恐分子袭击最优努力水平

$$a_i^* = \begin{cases} a_i^{\max}, & \theta_i v_i n < c_d \\ \sqrt{\frac{\beta_d c_d^2}{\theta_i v_i c_a n}}, & \theta_i v_i n > c_d. \end{cases}$$

将政府部门、暴恐分子的最优决策代入效用函数式(4)和式(5)中, 得到双方的最优效用分别为

$$U_G^* = \sum_{i=1}^N \left(-c_d + c_d \ln \frac{c_d}{n \theta_i v_i} \right), \quad U_T^* = \sum_{i=1}^N \left(n(1 - \theta_i) v_i + \frac{c_d^2}{n \theta_i v_i} \right).$$

证毕.

命题 1 及相关推论 1 和推论 2 的案例验证

关于政府、暴恐分子和社会公众的最优决策(如命题 1), 如命题 1 所示, 是依据效用函数(1)~效用函数(3)求解得到的均衡理论解. 在此基础上, 将第 4 节中案例参数代入到命题 1 中, 分析政民联防联控范围、目标价值变化下政府、暴恐分子和社会公众的最优决策动态变化. 随着政民联防联控范围和目标价值增加, 很容易得到政府应急反恐资源最优配置单调递增, 暴恐分子袭击最优努力水平单调递减. 在此, 主要着重分析政民联防联控范围、目标价值变化对社会公众最优决策的动态影响. 为了更清晰的展示社会公众努力水平随着 n 和 v_i 增加先增后减的变化趋势, 将 θ_i 设定为 0.85, 此时求解出政民联防联控范围临界值 $\bar{n} = 0.428$, 目标价值临界值 $\bar{v}_i = 29\,996.95$. 推论 1 和推论 2 的案例验证如图 6 和图 7 所示, 与其理论结果相一致.

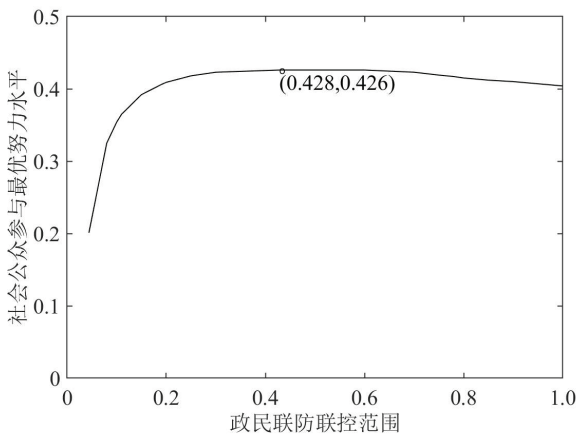


图 6 政民联防联控范围对公众参与努力水平影响

Fig. 6 The influence of the scope of joint prevention and control on the level of citizens' participation

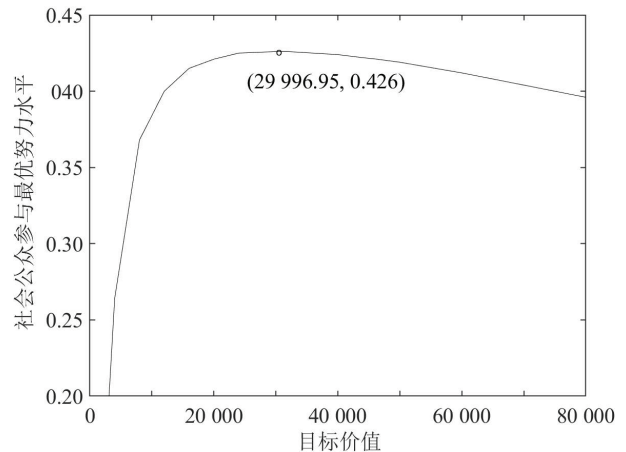


图 7 目标价值对公众参与努力水平影响

Fig. 7 The influence of target value on the level of citizens' participation