

何树红, 黄敏. 大数据背景下基于微分博弈模型的灾害适应性能力提升研究[J]. 灾害学, 2023, 38(1): 37-42. [HE Shuhong, HUANG Min. Research on Disaster Adaptability Improvement Based on Differential Game Model in the Context of Big Data [J]. Journal of Catastrophology, 2023, 38(1): 37-42. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2023.01.007.]

大数据背景下基于微分博弈模型的 灾害适应性能力提升研究*

何树红, 黄敏

(云南大学 经济学院, 云南 昆明 650500)

摘要: 在大数据信息时代背景下, 通过分析灾害治理的新特征和灾害适应性能力水平的评估因素, 建立政企合作治灾的两种微分博弈模型, 提出了测度灾害适应性能力水平的微分方程, 进一步求解出两种博弈模式下, 政企合作的整体最优收益值轨迹和长期中灾害适应性能力水平随时间变化的轨迹。结果表明, Stackelberg 模式下的灾害适应性能力水平和整体收益水平低于协同合作模式下的水平。通过关键参数灵敏度分析, 探讨灾害适应性能力水平的提升策略, 在同一种模式下, 降低政企对大数据技术的应用成本, 增强灾害适应对经济活动的正向影响, 均能提升灾害适应性能力水平。

关键词: 大数据; 灾害适应性能力水平; 微分博弈模型

中图分类号: X43; X915.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2023)01-0037-06

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2023.01.007

为了抵御自然灾害和应对灾害风险的不确定性, 适应性治理被认为是一种创新性、前瞻性的有用策略。社会组织以及其中的个人为了减少未来灾害造成的损失而采取的措施称为适应, 即从过去的事件中学习经验, 调整行为措施, 并预测未来情况以应对变化^[1]。灾害适应性能力是在一定环境条件下, 对于人类社会或自然灾害系统中能被感知的变化做出处理应对, 并且为了降低灾害脆弱性和建立恢复力所进行调整的一种能力, 具体可分为灾前的防灾减灾能力以及灾后的恢复能力。这二者的提升, 均能正向促进适应能力的强化。

适应性治理策略涉及多个参与者(政府、社区机构和公民)、多层次机构和多样性的制度, 并关注地方层面的制度匹配问题, 要求治理机构能够对实时发生的灾害做出快速响应, 治灾投入应与当地需求相匹配, 并能为未来的灾害预防制定长期计划^[2]。在欠发达的受灾地区, 资源和影响力往往比较有限, 政府更应该转向更具适应性的治理体系^[3-4]。科学的适应性治理需要立足于自身环境, 不同区域和社会环境下发生的灾害具有不同的种类、特点, 相应地也应有不同的治理策略^[5-7]。

对于灾害适应性能力的测度和治理策略的评价, 以往的文献中大多在恢复力和脆弱性的概念基础上构建聚焦于影响因素的指标分析方法^[8-11], 没有充分定量考虑到适应性能力的动态变化过程。在大数据时代背景下, 随着信息技术的发展, 以

及政府管理效率的提高、企业生产力水平的提高、地区加大对适应性治理的投入, 灾害适应性能力水平也会随之提升。

灾害治理过程中涉及不同决策者之间的战略互动, 这使得博弈论成为一种适用的研究方法^[12-14]。考虑到治理过程的复杂性、动态性、全局性、长期性特点, 本文运用微分博弈模型来研究灾害适应性能力的提升。多人联合行动, 每个人独立决策, 跨时影响共同的状态变量或者彼此的支付, 这种情况被模型化为微分博弈^[15]。本文建立了大数据背景下灾害适应性能力新的测度方法——体现大数据技术投入程度的适应性能力动态变化的微分方程, 以及政企合作治理灾害的微分博弈模型, 求解出博弈均衡解, 并进一步研究适应性能力的提升策略。

1 大数据背景下的灾害适应性能力评价

随着科学技术的进步, 信息处理技术飞速发展, 全球已步入了大数据时代, 大数据技术在全球各领域广泛应用, 更加深入的数字化和更加广泛的数据互联互通, 使得企业转型升级, 提高了生产效率, 也使得政府对于灾害的治理创新有效^[16-18]。在大数据背景下, 对于灾害适应性能力的评价有了新的特点。

* 收稿日期: 2022-08-16 修回日期: 2022-11-18

基金项目: 国家自然科学基金项目“西南地区泥石流灾害损失测度及救灾管理研究”(71661030)

第一作者简介: 何树红(1966-), 男, 汉族, 云南玉溪人, 博士, 教授, 主要从事灾害风险管理研究。E-Mail: jerome112233@163.com

首先,对体现灾害适应性能力水平的灾害治理制度的灵活性提出了更高的要求。处理人与环境关系的治理体系是动态变化的,随着时间的推移,政策规则应做出必要的调整,以保持与不断变化的生物物理或社会经济环境的兼容性^[19]。其次,适应能力的评价方法由静态指标转向动态的综合评价体系。最后,灾害适应性能力的衡量因素发生了变化。大数据背景下,信息通信技术在灾害管理中发挥着重要作用,其运用于灾害管理的各个阶段,涉及政府、灾害管理机构、响应者和社会。因此,适应能力的衡量因素也应涉及到与数据质量、信息技术应用效率等有关的方面。

由于快速反应的必要性,以及个人行为者倾向于最大化个人而不是集体结果,多个行为者不协调的配合可能会产生不佳的集体解决方案,因此企业和政府合作时,应由政府主导,避免管理调度不善^[20]。合作时,政府和企业各自对大数据技术这类信息资产的投入应用程度,将会影响到信息技术的质量,信息技术的质量直接影响到信息的内容和信息共享的效率^[21],而这也是大数据背景下,灾害适应性能力水平的重要决定因素。

2 模型假设与参数说明

灾害适应性能力的提升,需要构建政府主导,企业协作的治理模式,以实现灾害应对全过程的动态调整响应。本文建立的政企合作微分博弈模型有两种,一种是 Stackelberg 主从博弈,可视政府为领导者,企业为跟随者,政府给予企业一定的技术补贴,使其合理投入对大数据技术的研发应用,并确定好自己对技术投入的努力程度。此时企业根据政府的决策,再决定使其自身利益最大化的技术投入努力程度。第二种方式是政府和企业协同合作,双方追求的总目标为整体利益的最大化,并且共同确定各自对技术投入的努力程度。

本文假设博弈模型中的参与人完全理性,均以自身收益最大化为目标,并且拥有完全信息。参与人拥有完全信息的假设过于理想化,限于篇幅,本文未对参与人拥有不完全信息的情况再行讨论。微分博弈模型涉及到政府对信息技术的投入应用努力程度 $E_G(t)$ 、企业对信息技术的投入应用努力程度 $E_C(t)$ 、政府对企业的技术补贴比例 $\varepsilon(t)$ 三个控制变量,以及灾害适应性能力水平 $D(t)$ 一个状态变量。

假设1,政府和企业的技术成本是关于各自投入程度的凸函数,设其为二次函数,函数表达式为:

$$C_G(t) = \frac{\mu_G}{2} E_G^2(t); \quad (1)$$

$$C_C(t) = \frac{\mu_C}{2} E_C^2(t). \quad (2)$$

式中: μ_G, μ_C 为二者的成本系数, $C_G(t)$ 为政府对大数据技术应用付出的成本, $C_C(t)$ 为企业对大数据技术应用付出的成本。

现代治灾方法可以将大数据技术广泛运用于物理域、信息域、社会域中^[22],深度挖掘数据价值和相关信息,合理掌握对灾情的态势推演及应急策略,提升治灾效率。增加对大数据技术的投入应用,数据质量水平变高,相应的技术成本也会提高^[23]。

假设2,现有技术体系存在大数据技术迭代更新不及时的可能,难以满足全部的应用需求。用 θ 表示大数据信息技术水平的衰减系数,利用微分方程表示灾害适应性能力水平 $D(t)$:

$$\dot{D}(t) = \alpha E_G(t) + \beta E_C(t) - \theta D(t), D(0) = D_0 \geq 0. \quad (3)$$

式中: $\alpha > 0$ 表示政府技术投入对灾害适应性能力水平的影响系数, $\beta > 0$ 表示企业技术投入对灾害适应性能力水平的影响系数。

随着政府和企业对大数据技术应用的投入加大,防灾救灾效率会得到提高,从长期动态的灾害治理过程来看,灾害适应性能力水平也会随之提升。而随着信息技术的快速发展,技术若不及时更新,就难以获得高性能高可用性的数据和快速流通的信息流,不利于治灾效率的提升,导致灾害适应性能力水平降低。

假设3,政府和企业运用大数据信息技术水平可挽回的灾害经济损失 $S(t)$:

$$S(t) = \eta + \lambda_G E_G(t) + \lambda_C E_C(t) + \gamma D(t). \quad (4)$$

式中: $\eta > 0$ 表示在不涉及大数据信息技术应用时,由于社会其他方面的救灾努力可挽回的灾害经济损失。 λ_G 表示政府努力应用信息技术对经济活动的影响系数, $\lambda_C > 0$ 。 λ_C 表示企业努力应用信息技术对经济活动的影响系数, $\lambda_C > 0$ 。 γ 为灾害适应性能力水平对经济活动的影响系数。

在政府和企业的努力下,将大数据信息技术运用于灾害治理过程,可提升灾害适应性水平,挽回更多的经济损失。同时,在减灾救灾领域引入大数据,会支持和配合政府其他方面的大数据化,从而增强政府内部、政府与社会、政府与企业之间的联动性^[24],促进地区经济可持续发展,在将来可能发生的灾害情况下减少经济损失。

假设4,在 Stackelberg 博弈中,考虑到为促进技术共享和提高企业的积极性,政府给予企业一定的技术补贴,补贴系数为 $\varepsilon(t)$, $0 < \varepsilon(t) < 1$ 。

假设5,在无限时间范围内,政府和企业任意时刻都具有相同的贴现因子 ρ , $\rho > 0$ 。后文求解时,模型中的参数都是与时间无关的常数,为书写方便,省略 t 。并且在可挽回的灾害经济损失 $S(t)$ 中,政府对大数据应用的努力活动可挽回 π_1 比例的经济损失,企业对大数据应用的努力活动可挽回 π_2 比例的经济损失, $\pi_1 > 0$, $\pi_2 > 0$ 。

3 模型求解与分析

3.1 Stackelberg 主从博弈

关于微分博弈策略的选择,本文采用更贴近现实的反馈策略而不是开环策略。微分博弈中,参与人可以基于系统在每个时点的状态选择他在每个时点的行动,这类策略称为反馈策略,其由一个表明状态变量在每个时点的每个取值下的最优选择构成,并具有子博弈精炼的性质。反馈纳什均衡策略是马尔科夫完美均衡策略,因为它们是当前时间 t 和当前状态 $D(t)$ 的函数,独立于其他过去的状态值^[25]。最优值函数式通常被用来寻找反馈策略,对于每个参与者,分别构造连续可微的有界函数 $V_G(D)$, $V_C(D)$, $V_G(D)$ 表示政府最优收益值函数, $V_C(D)$ 表示企业最优收益值函数。

对于所有的 $E_G > 0$, $E_C > 0$, 有 $V_G(D)$ 、 $V_C(D)$ 满足下列 Hamilton - Jacobi - Bellman (HJB) 方程:

$$\rho V_c(D) = \max_{E_c \geq 0} \left\{ \pi_1 (\eta + \lambda_c E_c + \lambda_c E_c + \gamma D) - \frac{\mu_c}{2} E_c^2 - \varepsilon \frac{\mu_c}{2} E_c^2 + V_c'(D) (\alpha E_c + \beta E_c - \theta D) \right\}; \quad (5)$$

$$\rho V_c(D) = \max_{E_c \geq 0} \left\{ \pi_2 (\eta + \lambda_c E_c + \lambda_c E_c + \gamma D) - \frac{\mu_c}{2} (1 - \varepsilon) E_c^2 + V_c'(D) (\alpha E_c + \beta E_c - \theta D) \right\}. \quad (6)$$

利用逆向归纳法求解, 首先求解企业最优控制问题, 即在式(6)的右端部分, 对 E_c 求一阶偏导数, 并令其为零。

解之可得:

$$E_c = \frac{\pi_2 \lambda_c + V_c'(D) \beta}{\mu_c (1 - \varepsilon)}. \quad (7)$$

$$\rho V_c(D) = (\pi_1 \gamma - V_c'(D) \theta) D + \frac{(\pi_1 \lambda_c + V_c'(D) \alpha)^2}{2\mu_c} + \frac{(2(\pi_1 \lambda_c + V_c'(D) \beta) + (\pi_2 \lambda_c + V_c'(D) \beta))^2}{8\mu_c} + \pi_1 \eta; \quad (10)$$

$$\rho V_c(D) = (\pi_2 \gamma - V_c'(D) \theta) D + \frac{(\pi_1 \lambda_c + V_c'(D) \alpha)(\pi_2 \lambda_c + \alpha V_c'(D))}{\mu_c} + \frac{(\pi_2 \lambda_c + V_c'(D) \beta)(2(\pi_1 \lambda_c + V_c'(D) \beta) + (\pi_2 \lambda_c + V_c'(D) \beta))}{4\mu_c} + \pi_2 \eta. \quad (11)$$

由式(11)可知, 以 D 为自变量的函数式是 HJB 方程的解, 因此可令 $V_c(D) = f_1 D + f_2$, $V_c(D) = g_1 D + g_2$, 其中 f_1, f_2, g_1, g_2 为待求解的常数。

$$f_2 = \frac{(\pi_1 \lambda_c (\rho + \theta) + \pi_1 \gamma \alpha)^2}{2\mu_c (\rho + \theta)^2 \rho} + \frac{[2(\pi_1 \lambda_c (\rho + \theta) + \pi_1 \gamma \beta) + \pi_2 \lambda_c (\rho + \theta) + \pi_2 \gamma \beta]^2}{8\mu_c (\rho + \theta)^2 \rho} + \frac{\pi_1 \eta}{\rho}; \quad (12)$$

$$g_2 = \frac{[\pi_1 \lambda_c (\rho + \theta) + \pi_1 \gamma \alpha][\pi_2 \lambda_c (\rho + \theta) + \pi_2 \gamma \alpha]}{\mu_c (\rho + \theta)^2 \rho} + \frac{[\pi_2 \lambda_c (\rho + \theta) + \pi_2 \gamma \beta][2(\pi_1 \lambda_c (\rho + \theta) + \pi_1 \gamma \beta) + \pi_2 \lambda_c (\rho + \theta) + \pi_2 \gamma \beta]}{4\mu_c (\rho + \theta)^2 \rho} + \frac{\pi_2 \eta}{\rho}. \quad (13)$$

将 f_1, f_2, g_1, g_2 代入式(7)、式(8)、式(9)以及 $V_c(D)$ 、 $V_c(D)$ 中, 可求得:

政府在技术应用上的最优努力程度:

$$E_c^* = \frac{\pi_1 \lambda_c (\rho + \theta) + \pi_1 \gamma \alpha}{\mu_c (\rho + \theta)}, \quad (14)$$

企业在技术应用上的最优努力程度:

$$E_c^* = \frac{2(\pi_1 \lambda_c (\rho + \theta) + \pi_1 \gamma \beta) + \pi_2 \lambda_c (\rho + \theta) + \pi_2 \gamma \beta}{2\mu_c (\rho + \theta)}, \quad (15)$$

$$A = \left[\frac{\pi_1 \lambda_c \alpha (\rho + \theta) + \pi_1 \gamma \alpha^2}{\mu_c (\rho + \theta) \theta} + \frac{2\beta(\pi_1 \lambda_c (\rho + \theta) + \pi_1 \gamma \beta) + \pi_2 \lambda_c (\rho + \theta) \beta + \pi_2 \gamma \beta^2}{2\mu_c (\rho + \theta) \theta} \right]. \quad (18)$$

最优值:

$$V^*(D) = V_c^*(D) + V_c^*(D) = f_1 D + f_2 + g_1 D + g_2; \quad (19)$$

$$V^*(D) = \frac{[\lambda_c (\rho + \theta) + \gamma \alpha]^2 (\pi_1^2 + 2\pi_1 \pi_2)}{2\mu_c (\rho + \theta)^2 \rho} + \frac{[\lambda_c (\rho + \theta) + \gamma \beta]^2 (4\pi_1^2 + 8\pi_1 \pi_2 + 3\pi_2^2)}{8\mu_c (\rho + \theta)^2 \rho} + \frac{(\pi_1 + \pi_2) \gamma D}{\rho + \theta} + \frac{(\pi_1 + \pi_2) \eta}{\rho}. \quad (20)$$

3.2 协同合作模式

在此模式下, 政府和企业协同合作管理灾害, 通过网络互联、数据共享和信息交互, 提升了政府救灾能力, 也加强了信息安全保障和和应急协调效率, 同时企业可以深化大数据信息技术研究, 有利于数字化转型和产业升级。协同合作模式下, 政企双方追求的目标为可挽回经济损失的最大化。

此时总目标函数为:

$$\rho V(D) = \max_{E_c \geq 0, E_c \geq 0} \left[(\pi_1 + \pi_2) (\eta + \lambda_c E_c + \lambda_c E_c + \gamma D) - \frac{\mu_c}{2} E_c^2 - \frac{\mu_c}{2} E_c^2 + V'(D) (\alpha E_c + \beta E_c - \theta D) \right]. \quad (22)$$

在上式方程中, 分别对 E_c 、 E_c 求一阶偏导数, 并令其为零, 解之得:

$$E_c = \frac{\lambda_c (\pi_1 + \pi_2) + \alpha V'(D)}{\mu_c}; \quad (23)$$

$$\rho V(D) = [(\pi_1 + \pi_2) \gamma - \theta V'(D)] D + \frac{[(\pi_1 + \pi_2) \lambda_c + \alpha V'(D)]^2}{2\mu_c} + \frac{[(\pi_1 + \pi_2) \lambda_c + V'(D) \beta]^2}{2\mu_c} + \eta (\pi_1 + \pi_2). \quad (25)$$

令 $V(D) = f_1 D + f_2$, 其中 f_1, f_2 是待求解的常数, 可得: $V'(D) = f_1$, 则:

理性的政府依据企业的反应来决定自己的最优技术应用努力程度和补贴比例, 以实现自身利益最大化。此时对式(5)求关于 E_c 、 ε 的一阶导数, 并令其等于零, 可得:

$$E_c = \frac{\pi_1 \lambda_c + V_c'(D) \alpha}{\mu_c}; \quad (8)$$

$$\varepsilon = \begin{cases} \frac{2(\pi_1 \lambda_c + V_c'(D) \beta) - (\pi_2 \lambda_c + V_c'(D) \beta)}{2(\pi_1 \lambda_c + V_c'(D) \beta) + (\pi_2 \lambda_c + V_c'(D) \beta)}, & 2A > B \\ 0, & 2A \leq B \end{cases} \quad (9)$$

式中: $A = \pi_1 \lambda_c + V_c'(D) \beta$, $B = \pi_2 \lambda_c + V_c'(D) \beta$ 。将式(7)、式(8)、式(9)代入式(5)和式(6)中, 得:

则 $V_c'(D) = f_1$, $V_c'(D) = g_1$, 代入 HJB 方程, 可

$$\text{得: } f_1 = \frac{\pi_1 \gamma}{\rho + \theta}, \quad g_1 = \frac{\pi_2 \gamma}{\rho + \theta}.$$

最优补贴比例:

$$\varepsilon^* = \frac{2(\pi_1 \lambda_c (\rho + \theta) + \pi_1 \gamma \beta) - \pi_2 \lambda_c (\rho + \theta) - \pi_2 \gamma \beta}{2(\pi_1 \lambda_c (\rho + \theta) + \pi_1 \gamma \beta) + \pi_2 \lambda_c (\rho + \theta) + \pi_2 \gamma \beta}, \quad (16)$$

灾害适应性能力最优轨迹:

$$D^*(t) = A + (D_0 - A) e^{-\theta t}. \quad (17)$$

式中:

$$J = \int_0^{\infty} e^{-\rho t} [(\pi_1 + \pi_2) (\eta + \lambda_c E_c + \lambda_c E_c + \gamma D) - \frac{\mu_c}{2} E_c^2 - \frac{\mu_c}{2} E_c^2] dt. \quad (21)$$

为求解反馈均衡解, 假设存在连续有界可微的最优值函数 $V(D)$, 对所有的 $D \geq 0$, 都满足 HJB 方程:

$$E_c = \frac{\lambda_c (\pi_1 + \pi_2) + V'(D) \beta}{\mu_c}. \quad (24)$$

代入原方程

$$f_1 = \frac{\gamma (\pi_1 + \pi_2)}{\rho + \theta}, \quad (26)$$

$$f_2 = \frac{[(\pi_1 + \pi_2)\lambda_c(\rho + \theta) + (\pi_1 + \pi_2)\alpha\gamma]^2}{2\mu_c\rho(\rho + \theta)^2} + \frac{[(\pi_1 + \pi_2)\lambda_c(\rho + \theta) + (\pi_1 + \pi_2)\beta\gamma]^2}{2\mu_c\rho(\rho + \theta)^2} + \frac{\eta(\pi_1 + \pi_2)}{\rho} \quad (27)$$

将 f_1, f_2 代入 E_C, E_C 和 $V(D)$ 的表达式, 可得:
政府在技术应用上的最优努力程度:

$$V^{**}(D) = \frac{\gamma(\pi_1 + \pi_2)D}{\rho + \theta} + \frac{[(\pi_1 + \pi_2)\lambda_c(\rho + \theta) + (\pi_1 + \pi_2)\gamma\alpha]^2}{2\mu_c(\rho + \theta)^2\rho} + \frac{[(\pi_1 + \pi_2)\lambda_c(\rho + \theta) + (\pi_1 + \pi_2)\gamma\beta]^2}{2\mu_c(\rho + \theta)^2\rho} + \frac{\eta(\pi_1 + \pi_2)}{\rho}; \quad (30)$$

灾害适应性能力最优轨迹:

$$D^{**}(t) = B + (D_0 - B)e^{-\theta t} \quad (31)$$

式中:

$$B = \frac{\alpha\lambda_c(\rho + \theta)(\pi_1 + \pi_2) + \gamma\alpha^2(\pi_1 + \pi_2)}{\mu_c(\rho + \theta)\theta} + \frac{\beta\lambda_c(\rho + \theta)(\pi_1 + \pi_2) + \gamma\beta^2(\pi_1 + \pi_2)}{\mu_c(\rho + \theta)\theta} \quad (32)$$

3.3 均衡结果分析

根据上文计算结果可知, 在政企合作的两种模式下, 政府和企业对大数据技术应用的努力程度、灾害适应性能力水平以及总收益的最优值函数皆不相同。进一步分析比较, 可得出以下结论:

推论 1, $E_C^{**} > E_C^*, E_C^{**} > E_C^*$ 。

在协同合作模式下, 政府对大数据技术应用的努力程度、企业对大数据技术应用的努力程度大于 Stackelberg 模式下二者对大数据技术应用的努力程度。政府给予企业一定的技术补贴可以增加企业对技术应用的投入, 但最终的投入程度不及协同合作模式下的水平。在 Stackelberg 模式下, 当 $2[\pi_1\lambda_c(\rho + \theta) + \pi_1\gamma\beta] > \pi_2\lambda_c(\rho + \theta) + \pi_2\gamma\beta$ 时, 补贴比例 ε 大于零, 此时 ε 与 π_1 成正比关系, 说明随着政府对大数据技术的应用使得可挽回的经济损失占比提高时, 政府会加大对企业的补贴力度。

推论 2, $V^{**}(D) > V^*(D)$ 。

协同合作模式下, 可以达到政企合作体系的帕累托最优, 整体最优收益最高, 说明政企协同合作模式优于 Stackelberg 模式。协同合作下, 政企作为一个整体, 是以整体效用最大化为目标, 可以做出统一决策, 同时行动, 聚合性信息快速共享, 治灾时效性高。而 Stackelberg 模式下, 是以政府和企业各自效用最大化为目标, 短期来看 Stackelberg 模式可以提高政府和企业对大数据技术应用的积极性, 但在长期中可能会出现响应不及时, 反馈滞后的情况, 灾害管理效率低于协同合作。

$V(D)$ 的函数式可简写成:

$$V(D) = mD + n \quad (33)$$

式中: $m = \frac{\gamma(\pi_1 + \pi_2)}{\rho + \theta}$, 而在两种模式下 n 有不同的值, 则 m 可以视为政企合作救灾中关于不同灾害适应性水平的边际价值, $m > 0$, 随着灾害适应性水平 $D(t)$ 的提高, 整体最优收益值也会提高。

推论 3, Stackelberg 模式和协同合作下的灾害

$$E_C^{**} = \frac{\lambda_c(\rho + \theta)(\pi_1 + \pi_2) + \gamma\alpha(\pi_1 + \pi_2)}{\mu_c(\rho + \theta)}; \quad (28)$$

企业在技术应用上的最优努力程度:

$$E_C^{**} = \frac{\lambda_c(\rho + \theta)(\pi_1 + \pi_2) + \gamma\beta(\pi_1 + \pi_2)}{\mu_c(\rho + \theta)}; \quad (29)$$

最优值:

适应性能力轨迹分别为:

$$D^*(t) = A + (D_0 - A)e^{-\theta t}; \quad (34)$$

$$D^{**}(t) = B + (D_0 - B)e^{-\theta t} \quad (35)$$

由于大数据信息技术水平的衰减系数 θ 大于零, $e^{-\theta t}$ 为单减函数, 根据指数项前面的系数可以将适应性能力最优轨迹分为三种情况: ①, 当 $D_0 > A, D_0 > B$ 时, 随着时间的增加, 两种模式下的灾害适应性能力水平减少。②, 当 $D_0 = A, D_0 = B$ 时, 随着时间的增加, 两种模式下的灾害适应性能力水平皆保持平稳, 为不变的常数。③, 当 $D_0 < A, D_0 < B$ 时, 随着时间的增加, 两种模式下的灾害适应性能力水平也随之增加, 此时长期中, 通过投入应用信息技术水平, 能够实现灾害适应性能力的提升。而绝大多数情况下, A, B 的值皆可能大于 D_0 的值, 说明大数据技术的应用的确可以提升灾害适应性水平。

由于指数项在长期内 ($t \rightarrow \infty$) 时收敛, 所以长期灾害适应性能力水平由常数项 A 和 B 的值来决定。比较 A 和 B 的值, $B > A$, 说明长期内, 协同合作模式下的灾害适应性能力水平高于 Stackelberg 模式下的灾害适应性能力水平。

3.4 数值仿真

本节通过数值算例验证前文的结论, 并进行参数灵敏度分析, 探讨关键参数对灾害适应性能力水平的影响。首先分析在 Stackelberg 模式和协同合作模式下, 灾害适应性能力水平和收益值, 随着时间的变化趋势。各参数的赋值如表 1 所示。

根据上述参数, 可计算出: $E_C^* = 1.7, E_C^* = 3.575, E_C^{**} = 2.975, E_C^{**} = 4.55, V^*(D) = 2.1D + 41.21, V^{**}(D) = 2.1D + 45.39$, 进一步可解出关于 $D(t)$ 的微分方程, 从而得到两种模式下的灾害适应性能力水平。利用 matlab 软件, 可绘制出两种模式下灾害适应性能力水平的轨迹和最优收益值的轨迹, 如图 1 和图 2 所示。由图 1 和图 2 可知, 灾害适应性能力水平和整体收益水平随着时间的增加而增加, 同一时刻下, Stackelberg 模式下的灾害适应性能力水平和整体收益水平始终低于协同合作模式下的水平。随着时间的延长, 灾害适应性能力水平会收敛到一个定值, 此时为提升灾害适应性能力水平, 需改变模型中的参数, 使其收敛到更高的水平。具体而言, 可通过灵敏度分析得到提升策略。

表 1 参数赋值表

π_1	π_2	ρ	θ	μ_c	μ_c	α	β	λ_c	λ_c	γ	η
0.4	0.3	0.1	0.1	0.4	0.2	0.4	0.3	0.5	0.4	0.6	1

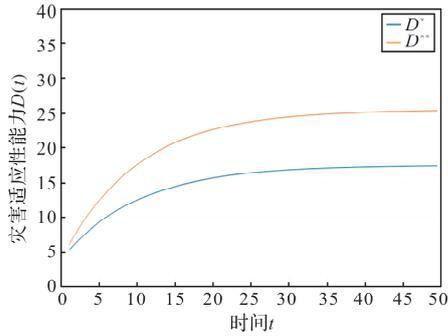


图1 不同模式下的灾害适应性能力水平

(注: 图中反映的是随着时间的变化, 灾害适应性能力水平的最优轨迹, 在不同的时刻 t , 适应性能力有不同的状态水平。此处的 t 指的是时刻/时期, 无具体的指代意义, 故不宜添加单位。纵坐标反映的是适应性能力在不同时点上的水平, 也无具体的测度单位, 下同)

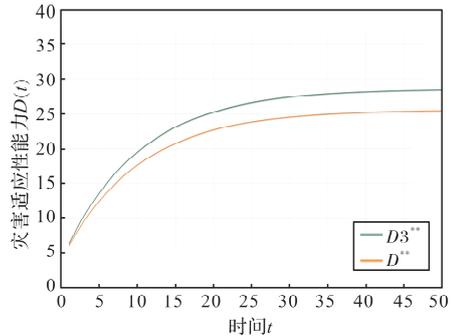


图5 γ 系数对灾害适应性能力水平的影响

通过分析, 可知当政府和企业对大数据技术的投入成本减少时, 灾害适应性能力可以得到提升。当灾害适应性能力水平对经济活动的影响增加时, 即灾害适应性能力水平将对可挽回的经济损失产生更大影响时, 灾害适应性能力可以得到提升。

4 结语

本文基于大数据信息时代的背景, 建立了政企合作治灾的两种微分博弈模型, 考虑了灾害适应性能力水平的提升策略。

在政企合作的初期, 政府可以向企业提供一部分技术成本补贴, 促使企业积极参与到救灾防灾中, 并优化技术水平。虽然企业和政府的目标不同, 企业追求经济效益, 而政府追求灾害治理的效率以及可挽回灾害损失的最大化, 但二者的成本目标往往一致, 即节省技术研发应用成本, 使得总成本最小。政府的政策引导和激励使得企业对信息技术的应用成本减少, 企业因此提高了技术研发的积极性, 也愿意和政府合作共享收益。长期中, 政企合作的方式趋于成熟高效, 此时采取协同合作模式, 共同治理灾害, 可以提升灾害适应性能力, 随着技术改进创新, 政企对大数据应用的成本也会渐渐减少, 灾害治理的效率得到提高。

长远来看, 灾害适应性能力提升产生的价值将有利于人与自然和谐共处、地区经济稳定发展、改善灾区民众生活质量。相应地, 这也会对灾害适应性能力产生一种正向的反馈作用, 即地区经济发展得好, 不仅是灾害适应性能力强的一种表现, 也是提升灾害适应性能力的一项积极因素。

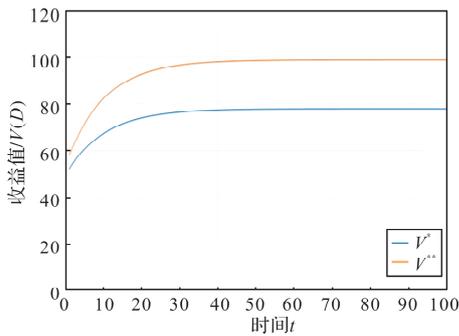


图2 不同模式下的整体收益

接下来对参数 μ_c 、 μ_c 、 γ 进行灵敏度分析, 在保持其他参数不变的情况下, μ_c 降低 0.1 时, 灾害适应性能力水平得到了提升(由 $D^{**} \rightarrow D1^{**}$), 如图 3 所示; 在保持其他参数不变的情况下, μ_c 降低 0.1 时, 灾害适应性能力水平得到了提升($D^{**} \rightarrow D2^{**}$), 如图 4 所示; 在保持其他参数不变的情况下, γ 增加 0.1, 即 $\gamma = 0.7$ 时, 灾害适应性能力水平得到了提升($D^{**} \rightarrow D3^{**}$), 如图 5 所示。

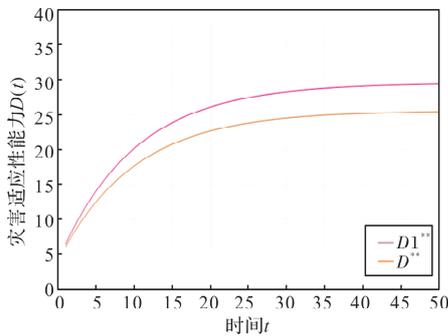


图3 政府技术投入的成本系数对灾害适应性能力水平的影响

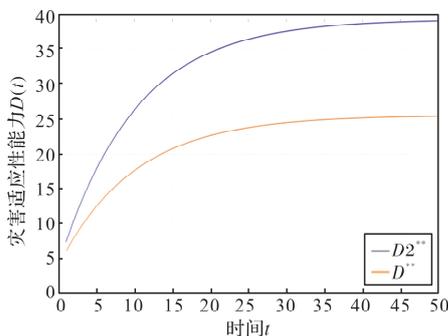


图4 企业技术投入的成本系数对灾害适应性能力水平的影响

参考文献:

- [1] ONUMA H, SHIN K J, MANAGI S. Reduction of future disaster damages by learning from disaster experiences [J]. Natural Hazards, 2017, 87(3): 1435 - 1452.
- [2] BARNES M L, WANG P, CINNER J E, et al. Social determinants of adaptive and transformative responses to climate change [J]. Nature Climate Change, 2020, 10(9): 823 - 828.
- [3] ENGLE N L. Adaptive capacity and its assessment [J]. Global Environmental Change, 2011, 21(2): 647 - 656.
- [4] WALCH C. Adaptive governance in the developing world: disaster risk reduction in the State of Odisha, India [J]. Climate and

- Development, 2019, 11(3): 238 – 252.
- [5] 葛咏, 李强子, 凌峰, 等. “一带一路”关键节点区域极端气候风险评价及应对策略[J]. 中国科学院院刊, 2021, 36(2): 170 – 178.
- [6] 邓岚, 马箐, 王俊, 等. 农业旱灾适应性综合评价分析: 以云南省施甸县为例[J]. 灾害学, 2014, 29(2): 102 – 108.
- [7] 袁海红, 吕旖, 张时婧. 海岛养殖户台风灾害适应性行为及其影响因素分析[J]. 自然资源学报, 2022, 37(4): 1089 – 1103.
- [8] VÁZQUEZ – GONZÁLEZ C, ÁVILA – FOUCAT V S, ORTIZ – LOZANO L, et al. Analytical framework for assessing the social – ecological system trajectory considering the resilience – vulnerability dynamic interaction in the context of disasters[J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2021, 59: 102232.
- [9] DARDONVILLE M, BOCKSTALLER C, THEROND O. Review of quantitative evaluations of the resilience, vulnerability, robustness and adaptive capacity of temperate agricultural systems[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 286: 125456.
- [10] DOMA L P, BECKER P, BERGSTROM J. Scrutinizing the relationship between adaptation and resilience: longitudinal comparative case studies across shocks in two Nepalese villages[J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2017, 23: 193 – 203.
- [11] 费璇, 温家洪, 杜士强, 等. 自然灾害恢复力研究进展[J]. 自然灾害学报, 2014, 23(6): 19 – 31.
- [12] SEABERG D, DEVINE L, ZHUANG J. A review of game theory applications in natural disaster management research[J]. Natural Hazards, 2017, 89(3): 1461 – 1483.
- [13] MOSCATO V, PICARIELLO A, SPERLI G. community detection based on game theory[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2019, 85: 773 – 782.
- [14] ERGÜN S, USTA P, GÖK S Z A, et al. A game theoretical approach to emergency logistics planning in natural disasters[J]. Annals of Operations Research, 2021: 1 – 14.
- [15] 莫顿·I·凯曼 (MORTON I Kamien), 南茜·L·施瓦茨 (NANCY L Schwartz). 动态优化: 经济学和管理学中的变分法和最优控制[M]. 王高望译. 北京: 中国人民大学出版社, 2016.
- [16] PARSONS M, REEVE I, MCGREGOR J, et al. Disaster resilience in Australia: A geographic assessment using an index of coping and adaptive capacity[J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2021, 62: 102422.
- [17] 欧阳桃花, 郑舒文, 程杨. 构建重大突发公共卫生事件治理体系: 基于中国情景的案例研究[J]. 管理世界, 2020, 36(8): 19 – 32.
- [18] 段华明, 何阳. 大数据对于灾害评估的建构性提升[J]. 灾害学, 2016, 31(1): 188 – 192.
- [19] YOUNG O R. Institutional dynamics: Resilience, vulnerability and adaptation in environmental and resource regimes[J]. Global Environmental Change, 2010, 20(3): 378 – 385.
- [20] COLES J, ZHUANG J. Decisions in disaster recovery operations: a game theoretic perspective on organization cooperation[J]. Journal of Homeland Security and Emergency Management, 2011, 8(1).
- [21] ERSOY P, BORUHAN G, KUMAR MANGLA S, et al. Impact of information technology and knowledge sharing on circular food supply chains for green business growth[J]. Business Strategy and the Environment, 2022.
- [22] 巴锐, 张宇栋, 刘奕, 等. 城市复杂灾害: “三层四域”情景分析方法及应用[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2022, 62(10): 1579 – 1590.
- [23] YANG J, ZHAO C, XING C. Big data market optimization pricing model based on data quality[J]. Complexity, 2019, 2019: 1 – 10.
- [24] 李云新, 贾东霖. 大数据在减灾救灾中的应用研究[J]. 电子政务, 2016(5): 110 – 116.
- [25] YEUNG D W K, PETROSYAN L A. Subgame consistent cooperative solutions in stochastic differential games[J]. Journal of Optimization Theory and Applications, 2004, 120(3): 651 – 666.

Research on Disaster Adaptability Improvement Based on Differential Game Model in the Context of Big Data

HE Shuhong, HUANG Min

(School of Economics, Yunnan University, Kunming 650500, China)

Abstract: Under the background of big data information era, by analyzing the new features of disaster management and the assessment factors of disaster adaptability level, two differential game models of government – enterprise cooperation in disaster management are established, and the differential equations for measuring disaster adaptability level are proposed. The overall optimal revenue trajectory of government – enterprise cooperation and the trajectory of disaster adaptability level over time in the long run show that the disaster adaptability level and overall revenue level under the Stackelberg model are lower than those under the cooperative model. Through the sensitivity analysis of key parameters, the strategies to improve the level of disaster adaptability are discussed. In the same mode, reducing the application cost of big data technology by government and enterprises and enhancing the positive impact of disaster adaptation on economic activities can all improve the level of disaster adaptability.

Keywords: big data; level of disaster adaptability; differential game model