

重大疫情防控的政府干预行为与优化策略

——基于博弈论视角和中国2013年H7N9防控实践

李燕凌, 王雯哲, 王健

(湖南农业大学公共管理与法学学院, 湖南 长沙 410128)

摘要: 基于博弈论视角建立人禽流感疫情传播扩散方程, 并以中国2013年H7N9防控效果有关数据进行检验, 结果表明该方程演绎结果与实际疫情扩散趋势一致。同时对政府救治、防控、宣传教育三类干预行为及其疫情控制效果进行分析, 发现政府有的干预行为具有负面效应。因此, 疫情防控的政府干预行为优化应以人为本, 尊重科学, 坚持干预行为主动性与谨慎性、疫情防控与舆情监管的辩证统一, 不断提高政府干预行为的精准度, 力求疫情防控取得最大社会效益、经济效益和生态效益。在救治、防控、宣传教育三类干预行为中, 重点优化“发布有关医药防治预案”“关闭或封锁重要场所、区域”、疫情信息日报制度等防控方面的干预行为。

关键词: 人禽流感疫情; 政府干预; 优化策略; 演化博弈论; 传染病SI模型; H7N9

中图分类号: D630

文献标志码: A

文章编号: 1009-2013(2018)02-0061-06

Government intervention behavior and optimization strategy of major epidemic control:

Based on game theory and China's H7N9 prevention and control practice in 2013

LI Yanling, WANG Wenzhe, WANG Jian

(School of Public Management & Law, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China)

Abstract: The spread equation of avian influenza epidemic was established and tested based on the game theory and the data of China's H7N9 prevention and control effect in 2013. The results showed that the deductive result of the equation was consistent with the actual epidemic trend. At the same time, three kinds of intervention behavior including government treatment, prevention and control, publicity and education and epidemic control effect were analyzed. The results show that certain intervention behavior has negative effect. Therefore, the this paper proposes some suggestion: optimize the government intervention under the rule of people-oriented, respect for science, adhere to the dialectical unity of initiative and prudence, epidemic prevention and control and public opinion supervision, improve constantly the accuracy of government intervention, and strive to achieve the greatest social, economic and ecological benefits of the epidemic prevention and control. Among the three treatments mentioned above, the focus is to optimize the "release of medical prevention and control plans", "close or blockade important places, areas" and information daily reporting system.

Keywords: human avian influenza; government intervention; optimization strategy; evolutionary game theory; SI epidemic model; H7N9

一、问题的提出

人禽流感是由禽流感病毒某些亚型中的一些

毒株感染人所引起的一种急性呼吸道传染病^[1]。普通禽流感病毒只对禽类有较强的传染性, 一旦感染人体就可能出现较高死亡率。大量研究表明, 在众多对具有感染性的病毒亚型禽流感中, H5N1高致病性禽流感(HPAI)和2013年首次在人体内发现的H7N9低致病性禽流感(LPAI)病毒因死亡率较高而备受人们关注。截止2016年10月31日, 中国共出现775名H7N9确诊病例, 其中316例患

收稿日期: 2018-02-19

基金项目: 国家社科基金重大招标项目(11&ZD171); 国家社科基金青年项目(16CGL062)

作者简介: 李燕凌(1964—), 男, 教授, 博士生导师, 新加坡南洋理工大学高级访问学者, 研究方向: 公共危机管理。

者死亡,死亡率达41%^[2]。近期中国再次进入H7N9禽流感高发季节,人禽流感传播途径复杂,疫情防控形式严峻,政府干预对疫情的有效控制无疑具有重要意义。

国内外文献大多从疫情防控的影响因素与政府应对机制的视角进行分析。学者们认为民众的疫情防控知识^[3]、民众对疫情风险的反应、对待疫情的谨慎态度^[4]、自发的行为^[5]、政府在防控措施中干预因素^[6]等都将影响流行病控制。任有权^[7]针对英国政府1745—1758年牛瘟疫情的干预行为进行了研究,总结分析当时英国政府应对疫情时的主观失误和客观限制;王胜^[8]通过对河北省1958年出现的肠道疫情进行研究,认为疫情不仅是个人生理现象,更是与经济、社会、自然、交通以及国际交流等密切相关的社会问题。郑红娥^[9]等通过分析禽流感事件体现的社会风险问题,提出了从“预测性”风险视角出发,通过连接国家知识与地方知识生产构建疫情风险管理机制;杜仪方^[10]提出用风险预防的原则制定“合理”的禽流感扑杀补偿标准。还有学者通过SIRS模型^[11]、反应扩散模型^[12]、甲型流感传染病模型^[13]等数理工具辅助,研究了人的风险感知对感染疫情的影响,对人禽流感疫情防控有一定的参考价值。

以上研究多从宏观层面对疫情防控进行分析,在模型构建和政策建议上缺乏较好的融合,同时,当前运用演化博弈理论预测疫情发展趋势的文献较少。故此,本研究运用演化博弈理论对传染病扩散模型进行了丰富,针对人禽流感疫情传播的特点建立疫情传播方程,充分考虑人禽流感疫情中涉及的自然扩散规律和社会经济根源,在此基础上,判断政府干预行为及其对疫情控制效果的影响,以期优化重大疫情防控政府干预行为提供借鉴。

二、人禽流感疫情演化与传播的演绎

1. 人禽流感疫情传播方程

在禽流感疫情的传播及其防控过程中必然会出现政府和民众的互动,政府和民众两个主体的互动实质就是一个博弈过程。基于两个主体博弈策略的假设,得出其不同策略的收益,然后进行群体策略演化的分析,最后得出人禽流感疫情传播方程。

现假设政府选择的策略有:“积极防控”(E)

和“消极放任”策略(N);社会民众策略有“随意流动”(F)和“主动配合”(S)。“随意流动”策略是指患者、疑似病例等病原体可能携带者,无视政府相关规定,不加防护地随意出入活禽市场等具有“高暴露性”“强扩散性”场所,由此导致感染或者扩散病原体。“主动配合”策略则指出现一定发热、急性呼吸道等类似轻微症状的患者,尤其是与患者密切接触者及近期接触过活禽的人,遵照政府部门相关规定,谨慎对待自身健康问题,在症状初期客观判断、自我观察、自觉联系定点医院排查治疗,以及其他做好自身防护工作、减少出入活禽市场等减少传播病毒或者受到感染可能的行为。

当政府采取“消极放任”策略、民众采取“随意流动”策略时,疫情发生大规模扩散的可能性概率记为 p_1 ,相应的社会经济损失记为D,此时社会损失则为 $p_1 \cdot D$;“积极防控”策略将其成本记为c,此时,民众“随意流动”策略造成社会出现疫情大规模扩散的概率将下降为 p_2 , $p_1 > p_2$ 。假定公众严谨对待人禽流感疫情,自觉做到配合政府措施、了解疫情资讯、采取自我防护、关注自身健康状况及环境变化等行为,那么其自我控制所付出相应的机会成本记为 α ;然而如果公众不顾自身情况,执意采取“随意流动”策略,最终导致疫情大规模扩散等严重后果时,将受到政府严厉追责惩处,惩罚额度记为b,显然 $b > \alpha$ 。疫情大规模扩散造成一定程度的社会经济损失及其负外部性,因此个体将承担损失 $p_1 \cdot D/n$, $\alpha > p_1 \cdot D/n$ 。至此,政府与民众的博弈策略组合共有4种,分别为(E,F)、(E,S)、(N,F)、(N,S),对应的收益为 $(-c-p_1 \cdot D, -b-p_1 \cdot D/n)$ 、 $(-c, -\alpha)$ 、 $(-p_1 \cdot D, -p_1 \cdot D/n)$ 、 $(0, -\alpha)$ 。

基于个体学习视角对群体策略演化倾向进行推导。用若干 τ 将时间t划分为若干固定时间间隔序列,个体将在每个时间间隔内进行行为修正。现在群体中随机抽取若干个体,并观察其行为和收益,一个采取策略j的个体被抽取到的可能性以 θ_j 表示,而采取策略j的个体被抽中后,则以 λ_j 表示其策略被观测到的可能性。如果采取策略i的个体观察到策略j个体的收益不低于自身,那么在固定时间间隔内修正策略进而转向j的可能性与策略间的收益差 $(\pi_j - \pi_i)$ 具有相关性,由此可以得到群体策略的一般复制动态模型:

$$d\theta_i(t)/dt = \theta_i(t) \cdot \left[\lambda_i \cdot \sum_{j \in A_i(\theta)} (\pi_i - \pi_j) \cdot \theta_j(t) - \sum_{j \in A_i(\theta)} \lambda_j (\pi_j - \pi_i) \cdot \theta_j(t) \right] \quad (1)$$

在人禽流感疫情发生时，由于政府和民众往往对疫情的病原学及流行病学特征缺乏了解，难以针对性预防，加之时间紧迫，符合行为经济学当中时间有限、信息不足的“有限理性”假设，社会群体行为具备明显的互相学习和模仿特点。因此人禽流感疫情扩散速度可以用“随意流动”策略的群体比例增长率 $d\theta_F(t)/dt$ 来间接测度：

$$d\theta_F(t)/dt = \theta_F \cdot (1 - \theta_F) \cdot \lambda_F (\pi_F - \pi_S) \quad (2)$$

将疫情自然传播 SI 模型和人禽流感一般化复制动态模型进行比较后就可发现：传染病 SI 模型 ($dI(t).dt = \eta \cdot I(t) \cdot [1 - I(t)]$)，其中代表单位时间内每个患者与健康者接触时使健康者受到感染的传染率 η ，与演化博弈模型中的 $\lambda_F(\pi_F - \pi_S)$ 有相同的含义。因此，人禽流感疫情的演化过程类似于传染病扩散 SI 模型，在疫情社会防控机制里不同策略的可观察性 λ 及不同策略的收益差 $\Delta\pi$ 将共同影响单位时间内每个病原携带者传染的人数，即 $\eta = \lambda \cdot \Delta\pi$ 。将社会人口总数设为 K ，采取“随意流动”策略 (F) 的人数设为 N ，代入公式 (2) 经过一定的积分变形，令 $N(0) = N_0$ ，可以求出流感疫情传播的频数方程。再根据在政府积极防控人禽流感疫情情况下，民众选择“随意流动”策略和“主动配合”策略支付费用分别为： $\pi_F = -b - p_2 V/n$ 和 $\pi_S = -\alpha$ 。因此，政府采取“积极防控”策略干预时，人禽流感疫情传播方程为：

$$N(t) = \frac{1}{\frac{1}{k} + (N_0 - \frac{1}{k}) e^{(\lambda_F/K)(a - b - p_2 D/n)t}} \quad (3)$$

2. 基于 H7N9 疫情数据的检验

根据国家卫计委应急办公室、疾控预防中心等公布的日报和新闻报道信息，选取 2013 年 3 月 31 日至 12 月 31 日的每日新增病例数据，应用 Logistic 模型，对人禽流感疫情传播方程进行曲线估计。其 Logistic 模型曲线估计公式为：

$$N(x) = \frac{1}{\frac{1}{v} + b_0 \cdot b_1^x} \quad (\text{其中 } v=K, \quad b_0 = (\frac{1}{N_0} - \frac{1}{K}), \quad b_1 = e^{-\beta}) \quad (4)$$

2013 年 3 月 31 日至 12 月 31 日，全国共确诊

H7N9 患者 144 例，故设定感染上限值 $K=144$ ，进行 Logistic 曲线拟合，得出方程可决系数为 0.973，说明该模型的拟合优度较高，可以解释该组数据 97.3% 以上的变动状况； F 检验的统计量值达到 1065，对应统计量极端值的概率 p 为 0，模型整体显著 (图 1)。

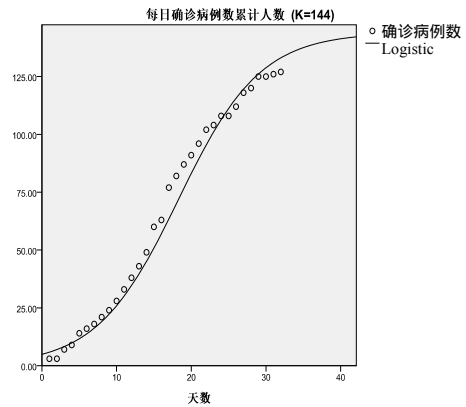


图 1 Logistic 曲线拟合图 (K=144)

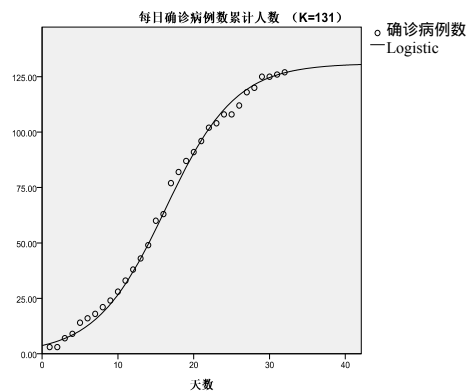


图 2 Logistic 曲线拟合图 (K=131)

为加强验证的有效性，再选取 2013 年 3 月 31 日至 5 月 31 日的疫情信息数据进行拟合。此间共确诊病例 131 人、死亡 39 人、康复出院 78 人、住院治疗 14 人。通过试错法发现 $K=131$ 时取得的拟合方程具有最优可决系数，即感染值 131 是取得理论最优防控效果的拟合值，因而将 $K=131$ 作为感染上限，代入方程后最终得到 Logistic 回归方程的可决系数达为 0.99，拟合优度较高；同时， F 检验的统计量值达到 2908，对应统计量极端值的概率 p 为 0，说明该模型也具有较高的显著水平 (图 2)。

通过不同感染上限值的设定进行 Logistic 模型拟合，不难看出人禽流感疫情传播方程是符合实际的疫情演化过程的，对于疫情扩散影响因素分析具有一定可行性。

三、政府干预行为及其疫情控制效应分析

在人禽流感疫情尤其是 H7N9 这一类新发现的病毒疫情的传播过程中,人们对疫情的认知不明,在有限的时间内难以确定传染源、传播途径及其病理学特征,同样缺乏疫苗和特效药等具有针对性的科学应对手段,同时,病毒还存在较高的扩散潜力和恶性变异可能。在医疗系统相对发达的西方国家,人均医疗资源相对丰富,采取被动的应对措施,对疫情扩散具有一定抵抗力。而中国人口密度较高且国内外流动频繁,国界线冗长,并存在横跨领土的候鸟迁徙路线,加之数量庞大的家禽、家畜共养现象作为流感病毒发生对人基因适应性变异的客观条件,中国必须时刻警惕并做好疫情流行前线国家的准备^[18]。为此,中国政府出台并实施了相关防控方案和一系列直接干预手段。分析政府出台的相关防控方案和干预行为对疫情控制效果、优化防控措施、缩小疫情扩散范围有着重要的意义与价值。2013年中国政府对于 H7N9 人禽流感的干预行为产生了一定程度的效果。这不仅得力于科技和知识发展带来的全社会疾控能力和意识的提升,更得力于政府对早期发现的新型病例的高度重视,为疾病控制起到了重要作用。

1. 救治方面的政府干预行为及其效应

救治方面的政府干预行为主要有加强病例监测、明确定点医院、建立分级诊疗、转诊机制、患者救治费用减免和医保报销保证机制等。加强病例监测,即通过疾病控制中心组织专家和社会力量加强病例监测,提高早期识别能力,按照“早检早治、边检边治、有治必检”原则及早进行抗病毒治疗;建立定点医院,并按照“集中患者,集中专家、集中资源、集中收治”要求,积极救治患者,提高重症与危重症救治能力和医疗救助效率,最大限度减少死亡;建立分级诊疗、转诊,以及患者医疗费用减免和医保报销保证机制,有利于提高医疗效率,杜绝因费用问题而影响或放弃治疗现象的出现。从频数方程变量的影响效应看,这些干预行为减少了社会恐慌情绪造成的疫情传播 λ_F ,从而有效地控制了疫情扩散。

2. 防控方面的政府干预行为及其效应

防控方面的政府干预行为可进行多维度细分,现主要对加强流行病学调查和疫情监测、发布《中

医药防治 H7N9 禽流感预案》、紧急关闭活禽交易市场、启动疫情信息日报告制度等 4 种重要干预行为的影响机理及其效应简要分析如下:

(1) 加强流行病学调查和疫情监测。基于流行病学调查明确防控的重点地区和人群,增强监管针对性,并在强制隔离感染者基础上强化重点对象及其密切接触者的追踪管理,严防疫情扩散蔓延。从频数方程变量的影响上来看,这些行为修正了扩散范围 K ,有利于降低政府应对成本,使得疫情的传播速度下降。

(2) 发布《中医药防治 H7N9 禽流感预案》。面对新型禽流感的爆发和蔓延,政府对其预防工作高度关注,地方政府卫生部门先后发布《中医药防治 H7N9 禽流感预案》,给出 H7N9 疫病高危人群服用板蓝根冲剂、玉屏风散颗粒,按摩迎香穴等预防办法,出发点是为了鼓励公众通过自我防治方式控制疫情,而实际上人们对于中药防治这类新型流感的有效性存在质疑,同时公众的行为具有明显的“羊群效应”,以官方形式发布此预案,造成公众不断抢购该类中药,导致较大的医疗资源浪费,同时加深了公众对疫情的恐慌感。从频数方程变量的影响上来看,该行为提高了社会恐慌情绪造成的疫情传播 λ_F ,增加了民众与政府合作的成本,导致传播速度 $N(t)$ 上升,不利于有效控制疫情传播。

(3) 紧急关闭活禽交易市场。在疫情爆发后,各地方政府下发紧急通知要求立即关闭活禽交易市场,市场内一律不得有活禽销售等经营活动。该防控行为目的在于切断感染源头,控制疫病传播。不可否认关闭市场、扑杀活禽的做法能够在最短时间内消除可能的感染源。但是,全面关停这种简单粗暴的干预存在较大问题,其弊端也不言而喻:对禽类行业打击巨大;容易导致公众恐慌感上升,由此引致公众自我防制成本提高;进一步加大政府防控成本,由于监管制度不完善,行业人员为了保护自身利益,选择暴力行为或者通过违法手段转运私藏活禽,绕过检验检疫部门,导致染病畜禽因地下市场交易而加大疫情扩散风险与政府防控成本;对生态和环境保护不利,如因为补偿机制尚不健全,扑杀处置补偿标准偏低,随意抛弃死亡家禽行为屡禁不止。从本研究提出的频数方程变量来看,该行为一定程度提高了社会恐慌情绪造成的疫情传播

λ_F , 增加了政府防控成本, 导致传播速度 $N(t)$ 上升。

(4) 启动疫情信息日报制度。在疫情发生四日后, 卫生和计划生育委员会要求启动疫情信息日报制度, 并且通过中国疾控预防中心等机构的官方网站进行公布, 包括新增人数、累计人数、死亡人数等。该行为虽然保障了公民的基本知情权, 但是也有学者指出该行为存在为公布而公布的现象, 由于公众对于疫情状况和相关公示数据无法作出专业性解读, 极易片面地解读相关信息, 从而导致公众恐慌等负面社会效应。从频数方程变量的影响来看, 该行为也在一定程度上升高了社会恐慌情绪造成的疫情传播 λ_F , 导致传播速度 $N(t)$ 上升。

3. 宣传教育方面的政府干预行为及其效应

宣传教育方面的政府干预行为主要是进行健康教育知识科普、开展爱国卫生运动、及时回应社会关切, 防控谣言等。卫生厅下发紧急通知, 要求各级卫生系统加强 H7N9 禽流感健康教育工作, 充分利用报纸、广播、电视、网络媒体开展宣传教育, 发放形式多样化的健康教育传播材料, 同时号召各级医疗机构提供流感防控知识咨询服务; 其次根据全国爱国卫生运动委员会《关于大力开展爱国卫生运动, 切实做好春夏季传染病防控工作的通知》要求, 各地、各部门大力开展爱国卫生运动, 包括卫生陋习劝阻行动、环境卫生整治行动、违规养禽阻止行动、患病生物控制行动, 倡导健康文明的生活方式; 同时及时回应社会关切, 澄清谣言, 加强对散布虚假信息的行为的监管, 营造有利于防控工作的氛围。从频数方程变量的影响上来看, 这些行为降低了公众的谨慎配合成本, 从而能够促进公众选择“主动配合”策略, 控制疫情扩散。

四、重大疫情防控的政府干预行为优化

基于上述研究, 笔者认为政府对于重大疫情尤其是人禽流感疫情防控的干预应该进一步优化, 其中重点是防控方面的干预行为的优化。

基于演化博弈分析中的最优解为“政府积极防控、民众主动配合”, 政府干预行为优化的基本原则和策略是: 以人为本, 尊重科学, 坚持干预行为主动性谨慎性、疫情防控与舆情监管的辩证统一, 不断提高政府干预行为的科学性和精准度, 力求疫情防控取得最大社会效益、经济效益和生态效

益。基于上述原则和策略, 现将防控方面的政府干预行为优化分述如下:

(1) 政府面向社会公众发布有关医药防治预案等干预行为的优化。基于 2013 年 H7N9 禽流感防控中的《中医药防治预案》发布行为存在负效应的分析, 政府实施类似干预行为前必须组织权威机构或专家团队对其可能出现的负效应进行评估, 对其防治有效性和干预的可行性进行论证, 打消公众顾虑。在此基础上把握好此类防控干预措施实施的时机、范围、频次, 达到既可尽早有效控制疫情扩散, 又能降低民众谨慎配合的成本。为避免造成公众的盲目哄抢提升社会恐慌情绪, 政府发布相关防治预案的时机宜选择在疫情快速扩散之前; 医药防治预案发布也应为官方专业协会或权威学会等“第三方”组织机构; 发布形式也宜由专业协会或学会将其与相关科普宣传教育巧妙融为一体, 让公众在疫情蔓延到所在社区前就有了心理、知识、器物等方面比较充分的准备, 从而有效避免社会恐慌感的蔓延。

(2) 关闭或封锁重要场所、区域等干预行为的优化。不论是流行病学研究还是基于人禽流感扩散模型的预测, 政府干预行为都要讲究科学性, 运用科学手段强化政府干预精准度。这也是提高疫情防控的政府干预效能的关键一招。关闭或封锁重要场所、区域等干预行为仍可在以下几个维度进行优化: 首先是构建疫情防控统一指挥平台, 确保疫情防控信息准确、信息交流通畅。疫情防控是一项系统化的工程, 需要多层次、多部门、多主体共同参与, 构建统一指挥平台, 加强信息互通就能及时有效精准地界定必须关闭或封锁的场所、区域, 避免盲目扩大或缩小强制关停场所、封锁区域; 其次是在确保防治效果的前提下, 对关闭或封锁的场所、区域进行的强制扑杀、隔离等行为要有严格的规范, 政府应及时划拨专项补偿资金, 同时还可以引入第三方保险服务, 对养殖户进行补偿, 确保行业稳定。第三, 应当加强疫区、尤其是关闭或封锁重要场所、区域等重点疫区人员、疫情和生态环境的监管, 搞好疫情监测和流行病学调查。总之, 关闭或封锁重要场所、区域等干预行为应力求最大社会效益、经济效益和生态效益。

(3) 启动疫情信息报告制度等干预行为的优

化。社会恐慌感的控制是重大疫情防控的重要一环。在现代网络社会,恐慌等负面情绪传染速度更快,对社会经济的负面影响更大。因此,在重大疫情防控过程中,优化“疫情信息报告制度”等干预行为对于社会公众恐慌感的控制至关重要。笔者认为优化这方面的政府干预行为,一方面要在尊重公民知情权的情况下,根据疫情和舆情发展态势,灵活选用半月报、月报等形式将疫情信息报告予以公示,与此同时应邀请权威专家对全国或区域疫情总体发展趋势予以适度解读和预测,以降低社会公众恐慌感。另一方面,应大力加强网络舆情和谣言监控,加大散布谣言者的惩治力度,通过建立谣言散布黑名单的方式扩大监管力度,形成疾病防控的积极氛围,减少社会恐慌等负面倾向产生,从正面引导民众配合疫情防控措施。

当然,救治和宣传教育方面的政府干预行为也仍然有优化的空间。重大疫情的发生和蔓延不仅有其扩散的自然规律,也隐含着深刻的人类社会经济根源,因此,宣传教育方面的干预应着眼于提高大众的科学知识水平,尤其是普及有关病理及疫情防控知识,提升民众对疫情发生、发展自然规律和社会经济根源的认知,在摒弃不良生产方式、生活习惯和传统文化糟粕的同时提高实际预防能力。就救治方面的政府干预行为而言,无论是加强病例监测、还是建立定点医院、分级诊疗与转诊机制,抑或患者救治费用减免和医保报销,都应以提高效率为皈依,本着没有最好只有更好的原则不断创新和优化。

参考文献:

- [1] 周伯平,黎毅敏,陆普选.人禽流感[M].北京:科学出版社,2007:1-4.
- [2] Xiang N, Li X, Ren R, et al. Assessing change in avian influenza a(H7N9) virus infections during the fourth epidemic - China, September 2015-August 2016[J]. *Mmwr Morb Mortal Wkly Rep*, 2016: 1390-1394.
- [3] Segal L, Maxin D, Eaton L, et al. The effect of risk-taking behavior in epidemic models. [J]. *Journal of Biological Dynamics*, 2015, 9(1): 229.
- [4] Kleczkowski A, Maharaj S, Rasmussen S, et al. Spontaneous social distancing in response to a simulated epidemic: a virtual experiment[J]. *BMC Public Health*,

2015, 15(1): 973.

- [5] Poletti P, Ajelli M, Merler S. The effect of risk perception on the 2009 H1N1 pandemic influenza dynamics[J]. *Plos One*, 2012, 6(2): e16460.
- [6] Wessel L. Public health interventions for epidemics: implications for multiple infection waves[J]. *BMC Public Health*, 2011, 11(1): S2-S2.
- [7] 任有权. 英国牛瘟与政府干预(1745—1758)[J]. *世界历史*, 2015(3): 66-76; 158.
- [8] 王胜. 新中国最大一次伤寒疫情及其社会成因——以河北省为例[J]. *河北学刊*, 2013(4): 60-64.
- [9] 郑红娥, 武晋, 李小红. 风险社会背景下农村突发性事件的风险叙事: 暗喻、隐患与应对——以禽流感事件为例[J]. *南京农业大学学报(社会科学版)*, 2016(1): 9-21; 162.
- [10] 杜仪方. 何为禽流感中扑杀行为的“合理”补偿——兼论风险规制与行政补偿标准的新发展[J]. *行政法学研究*, 2016(3): 65-74.
- [11] Santermans E, Robesyn E, Ganyani T, et al. Spatiotemporal evolution of Ebola virus disease at sub-national level during the 2014 West Africa epidemic: Model scrutiny and data meagreness[J]. *Plos One*, 2016, 11(1): e0147172.
- [12] Wang W, Cai Y, Wu M, et al. Complex dynamics of a reaction-diffusion epidemic model[J]. *Nonlinear Analysis Real World Applications*, 2012, 13(5): 2240-2258.
- [13] Inaba H. Endemic Threshold and Stability in an Evolutionary Epidemic Model[M]// Castillo-Chavez C, Blower S, Driessche PVD, et al. *Mathematical Approaches for Emerging and Reemerging Infectious Diseases*, 2000: 337-359.
- [14] 李勇建, 王循庆, 乔晓娇. 基于广义随机 Petri 网的重大传染病传播演化模型研究[J]. *中国管理科学*, 2014(3): 74-81.
- [15] 李燕凌, 车卉. 突发性动物疫情中政府强制免疫的绩效评价——基于 1167 个农户样本的分析[J]. *中国农村经济*, 2013(12): 51-59.
- [16] 刘德海, 王维国, 孙康. 基于演化博弈的重大突发公共卫生事件情景预测模型与防控措施[J]. *系统工程理论与实践*, 2012(5): 937-946.
- [17] 张国清. 公共危机管理和政府责任——以 SARS 疫情治理为例[J]. *管理世界*, 2003(12): 42-50.
- [18] Zeng G. Strategic analysis on responding human avian flu and flu pandemic in China.[J]. *生物医学与环境科学*, 2006, 19(2):158-161.

责任编辑: 黄燕妮