

新冠疫情下大型体育赛事风险评估



王逸伟¹, 谢明¹, 谢晓雯¹, 王志鹏², 王敏³, 詹秀秀¹, 刘闯¹, 张子柯^{3*}

(1. 杭州师范大学阿里巴巴复杂研究中心 杭州 311121; 2. 北京师范大学系统科学学院 北京 海淀区 100875;
3. 浙江大学传媒与国际文化学院 杭州 310058)

【摘要】通过对东京奥运会疫情与舆情的分析来评估北京冬奥会举办期间疫情及舆情方面的潜在风险。结果表明,新冠疫情影响和东京奥运会的舆情之间存在较强的时滞相关性。对于疫情,在城市层面,使用多主体建模方法对赛事举办城市内可能的疾病传播进行了模拟;在奥运村层面,基于 SEIR 传播模型,对北京冬奥会期间奥运村中的病毒传播情况进行了模拟;结合时序预测模型对北京冬奥会的举办进行了风险分析。

关键词 多主体建模; 基本再生数; 北京冬奥会; 新冠疫情; SEIR 模型; 时序预测
中图分类号 TP391 **文献标志码** A **doi**:10.12178/1001-0548.2021352

Risk Assessment of Large-Scale Sports Events in the Context of COVID-19

WANG Yiwei¹, XIE Ming¹, XIE Xiaowen¹, WANG Zhipeng², WANG Min³,
ZHAN Xiuxiu¹, LIU Chuang¹, and ZHANG Zike^{3*}

(1. Alibaba Research Center for Complexity Sciences, Hangzhou Normal University Hangzhou 311121;
2. School of Systems Science, Beijing Normal University Haidian Beijing 100875;
3. College of Media and International Culture, Zhejiang University Hangzhou 310058)

Abstract This paper assesses the potential risks of epidemic situation and public opinion during the Beijing Winter Olympic Games by analyzing the epidemic situation and public opinion of the Tokyo Olympic Games. The results show that there is a strong time-lag correlation between the COVID-19 epidemic and the public opinion of the Tokyo Olympics. For the epidemic situation, the multi-agent modeling method is used at the city level to simulate the possible spread of diseases in the city where the event was held. At the Olympic village level, the modified SEIR transmission model is modified to simulate the virus transmission in the Olympic Village during the Beijing Winter Olympic Games. At the end, the risk analysis of the Beijing Winter Olympic Games is carried out based on the time series prediction model.

Key words agent-based modelling; basic reproductive number; Beijing winter olympic games; COVID-19; SEIR; temporal prediction

COVID-19 疫情席卷全球,扰乱了社会的正常运转,加剧了全球局势和社会舆论的不稳定性,而具有典型聚集特征的体育赛事,也不可避免地受到影响^[1-3]。东京奥运会、欧洲杯延期,各国职业联赛被迫取消,疫情的蔓延给体育赛事的顺利开展带来了诸多不确定性因素。如给运动员的身心状况带来极大冲击^[4-5]。即便没有观赛人员,运动员的感染风险也仍然存在^[6]。文献 [7] 分析了疫情背景下东京

奥运会召开和取消可能带来的影响,指出实时更新的疫情数据对于做出正确的奥运会相关决策的重要性。文献 [8] 基于 SEIR 模型提出了 SEIARH 模型,评估了不同疫苗覆盖率下东京奥运会的疫情风险,结果表明当疫苗覆盖率达到 80% 时,疫情的传播可以得到有效控制。这些模型往往基于巨量的、高成本的人员流动数据,并辅之复杂的传染病或机器学习模型,来模拟广袤区域内的疾病传播情

收稿日期: 2021-07-21; 修回日期: 2021-10-15

基金项目: 国家社会科学基金重大项目 (19ZDA324); 国家自然科学基金重大项目 (92146001); 国家自然科学基金面上项目 (61873080); 浙江省自然科学基金 (LQ22F030008)

作者简介: 王逸伟 (1998-), 男, 主要从事复杂网络与数据挖掘方面的研究。

*通信作者: 张子柯, E-mail: zkz@zju.edu.cn

况。且由于政策、地理、天气等不可抗力因素影响,在大型赛事举办期间,人员流动规律几乎是不可知的。基于此,本文将范围和模型同时进行简化:在不适用人员流动数据的情况下,仅在奥运村与观赛场馆外围两个关键场景内,利用常见的 SEIR 及 ABM 模型进行疾病传播模拟和分析。

此外,疫情的传播不可避免地导致人类行为的改变,从而反过来影响疫情的传播。文献 [9] 考虑了局部信息、全球信息和接触信息,并利用连续平均场模型来研究这 3 类信息的流动对疾病传播的影响。文献 [10] 基于微观马尔可夫链方法 (MMCA) 分析揭示了流行病发病率随意识变化的关系,并且计算了由多层拓扑结构及意识流动过程所决定的流行病阈值。考虑到疫情与大型体育赛事相关舆情之间的复杂关系,在研究的起点,本文首先基于相关数据计算了两者的相关性。同时,受文献 [9] 的启发,在进行奥运村传播模拟时引入了局部舆情的概念,以分析舆情流动对奥运村中疫情传播的影响。

综上,本文通过全球疫情传播数据和东京奥运会的舆情分析,预测北京冬季奥运会的潜在风险和舆情走向,梳理与剖析新冠疫情给体育赛事带来的影响与冲击,对可能产生的风险制定应对措施。

1 数据集描述与分析

1.1 数据集描述

1) 历届奥运会数据。从 Kaggle 开源竞赛网站收集了近 120 年共 30 届夏季、冬季奥运会参赛国与参赛运动员的数据,包括运动员编号、所属国家/地区、奥运会届次、参赛年份及赛季(夏季/冬季),用以预测后续感染人数。

2) 疫情数据。数据集取自约翰霍普金斯大学的系统科学与工程中心 (center for systems science and engineering, CSSE), 收集了 2020 年 2 月 15 日-2021 年 6 月 10 日共 229 个国家的完整疫情数据。经处理后只保留“每日新增感染数”“每百万人新增感染数”和“总感染数”3 列特征。

3) 舆情数据。爬取了 47 430 条与东京奥运会相关的中英文及日语主流媒体的新闻报道。其中,中英日 3 种语言新闻数量分别占比 8.00%、42.86% 和 49.14%。在各新闻来源中,新闻数最多的前 5 位分别是朝日新闻、路透社、每日新闻、纽约时报和腾讯新闻网,分别占比 32.24%、22.60%、16.20%、2.49% 和 1.28%。考虑到工具的可获得性与媒体的权威性,仅对英文新闻进行处理和清洗,并对其做

了词频统计,除去与关键词直接相关的单词 (Tokyo、Olympics 等) 后,按降序排列,词频前十的词有: coronavirus、Japan、postpone、athlete、pandemic、health、vaccine、public、virus、international。可以看到,媒体对东京奥运会关注的焦点多集中在疫情上。

1.2 相关性分析

为研究关于东京奥运会的舆情与疫情之间的关系,从国际、中国国内、日本国内 3 个层面入手,探究疫情与舆情之间的相关性。图 1a 显示了 2020 年 2 月 15 日-2021 年 6 月 10 日期间每日的全球新增病例数和东京奥运相关新闻报道数量,两条曲线中,实线表示世界范围内每日关于东京奥运的新闻报道数量,虚线表示全球每日疫情的新增病例数。结果表明,全球疫情在 2020 年末和 2021 年 4 月左右达到高峰。东京奥运的社会舆论三次达到高峰,时间点分别对应图 1a 中 3 条纵向虚线。从 2020 年 2 月 15 日关于东京奥运会的第一篇报道开始,就有相当多的报道就东京奥运会是否会延期举办的问题展开集中讨论,在 2020 年的 2 月 26 日达到第一次舆论高峰。2020 年 3 月 20 日国际奥委会正式发文称会延迟举办东京奥运会,引发关于东京奥运会讨论的最高峰。第三次小高峰出现在国际奥委会决定东京奥运会举办时间,即 2020 年 3 月 24 日。

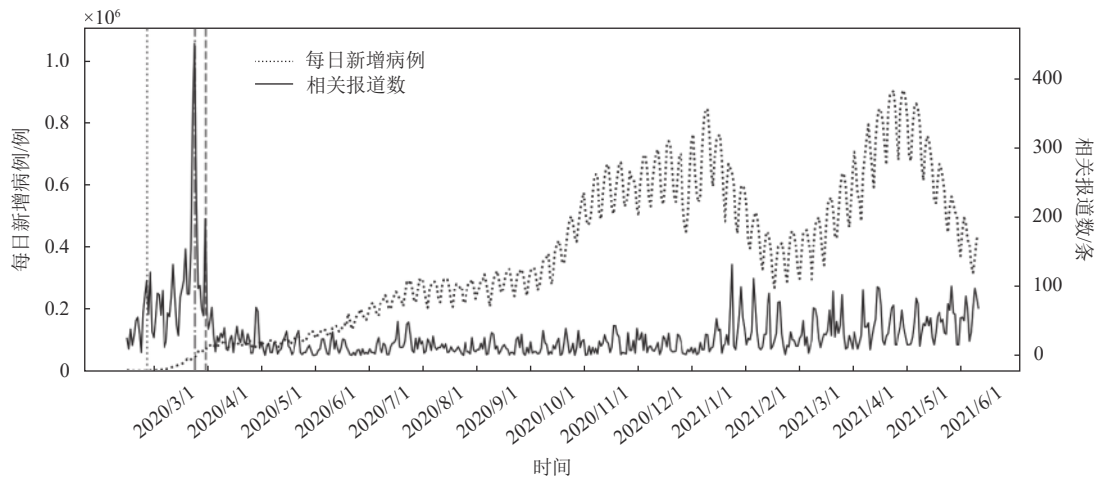
为进一步研究在舆论高峰时段社会舆论的关注焦点,本文对这三个时间段的新闻数据进行了词频统计 (图 1b)。可见在世界疫情传播的高峰期,有关东京奥运会的舆论焦点多集中在疫情背景下东京奥运会的推迟问题上。进一步分析可知,2020 年 2 月的新闻报道中,coronavirus、postpone 出现频率较高,可见在疫情爆发背景下,社会大众对东京奥运会能否顺利召开这一议题高度关注。国际奥委会鉴于疫情形势,于 2020 年 3 月 20 日正式宣布推迟举办东京奥运会,这再次引发了舆论高峰,时间点对应图 1b 中的纵向虚线。2020 年 3 月 24 日,国际奥委会宣布了东京奥运会推迟举办的具体日期,当日的舆情词频统计中,postpone 出现词频较高。

为了解各区域疫情的爆发与舆情波动之间是否存在相关性,本文不仅分析了世界范围内的舆情和世界疫情的相关程度,还分析比较了中国国内和奥运会相关的舆情与国内疫情、中国相关舆

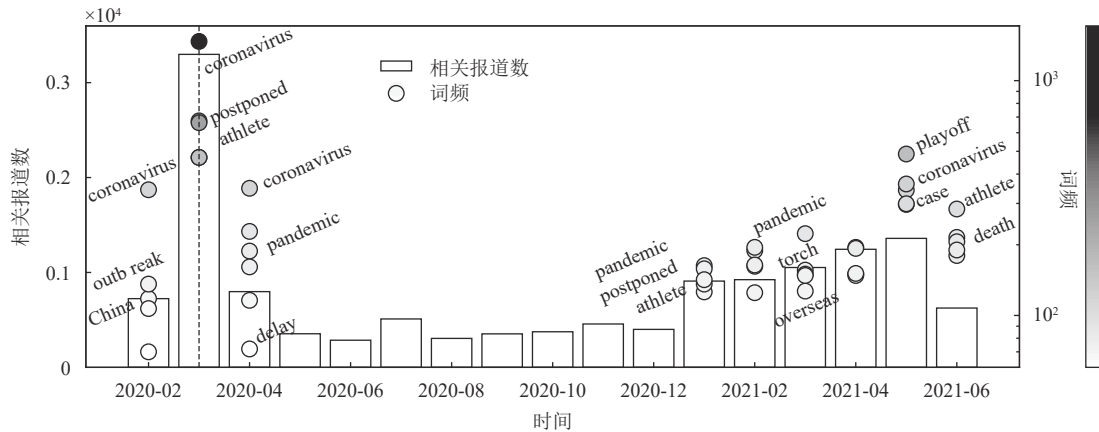
情与日本疫情、世界相关舆情与日本疫情、日本相关舆情与世界疫情的关系, 如表1所示。其中, 第一行是中国针对东京奥运每日报道数和中国每日新增病例数、日本每日新增病例的相关性系数, 中国针对东京奥运的舆情与日本的疫情发展有更高的线性相关性, 可见舆论普遍对赛事举办地的疫情情况持更高的关注度。表格的后两行分别计算了无延迟和有延迟(括号内表示时延15

天之后的相关性系数)疫情数据两种情况下, 疫情和舆情之间的相关性系数, 相关性系数后的括号内为相应的 p 值。相关性计算为:

$$r_T = \frac{\sum_{i=1}^K (X_i - \bar{X})(Y_{i+T} - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^K (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^K (Y_{i+T} - \bar{Y})^2}} \quad (1)$$



a. 东京奥运会前全球疫情-舆情演化图



b. 各月舆情详情图, 图中圆圈代表该月的一个热度关键词

图1 疫情与舆情时序演化图

表1 新增病例与东京奥运相关报道数的相关性系数

舆情	疫情		
	中国	日本	世界
中国	0.23	0.39	-
日本	-	-	0.38(0.65)
全球	-	0.12(0.50)	0.08(0.54)

该表达式计算了两时间序列 $X = (X_1, X_2, \dots, X_N)$ 、 $Y = (Y_1, Y_2, \dots, Y_M)$ 之间的皮尔逊时滞相关性, 时滞长度为 T , 其中 $K = M - i$ 。将疫情、舆情数据分别

看作 x 和 y , 取时滞长度为 15 天以计算两者的时滞相关性。由表1可知, 15 天时日本舆情与世界疫情、世界舆情与日本疫情、世界舆情与世界疫情之间均具有较高的时滞相关性 (≥ 0.5)。

2 城市区域传播模拟

为研究流行病的传播力并评估北京冬奥会举办过程中可能遇到的风险, 本文采用多主体建模方法^[11]对城市范围内观赛行为可能引发的疫情扩散

进行模拟。

2.1 个体状态

1) 疾病状态。由于整个观赛过程的时间跨度较小(1~2天左右),个体疾病状态不会发生很大变化,因此仅定义 S (易感)和 E (潜伏)两个疾病状态。处于易感状态下的个体能够被病毒感染,而处于潜伏状态下的个体能够以一定概率感染有限范围内的易感个体。图 2b 展示了一个状态转移实例:当易感者(灰)距离潜伏者(黑)较近时被感染。为了与真实情况匹配,定义感染概率,如式(2)所示。其中 d 为距离潜伏者的距离; p_0 为基础感染率, d_0 为阈值距离,当周围存在潜伏者 E 时,易感者 S 以 $\beta(d)$ 的概率被病毒感染,超过此距离后,病毒的感染能力呈指数形式逐渐下降; ω 为取值 0~1 的比例系数,体现了因佩戴口罩等保护措施病毒传播能力的下降程度,没有保护措施时取 $\omega = 1$,在佩戴口罩时取 $\omega = 0.5$ 。

$$\beta(d) = \begin{cases} \omega p_0 & d \leq d_0 \\ \omega p_0 e^{-(d-d_0)} & d \geq d_0 \end{cases} \quad (2)$$

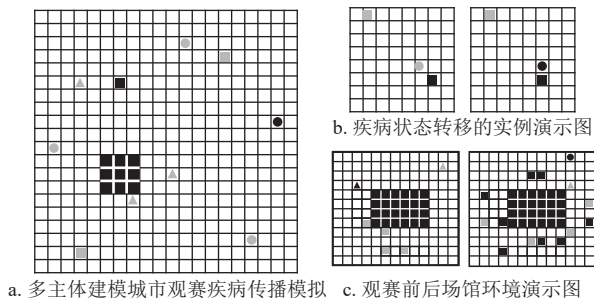


图 2 多主体建模示例

2) 行为状态。为模拟城市中的个体根据周围环境的变化而改变自身的行为,本文在文献[12]的基础上假设个体有以下 4 种行为:散步、追踪、躲避、驻留。散步:个体向上下左右 4 个方向进行随机游走。追踪:该状态下个体有一个追踪点,其目的是到达该追踪点。对于文献[13]中所提及的“避障”,可以认为其是将追踪点设置在障碍物周围的一种特殊追踪行为。躲避:当个体前进方向存在其他个体时触发躲避状态。个体首先静止等待一段时间,在等待时间内若前进方向为空则前进;若超过等待时间,则个体会向旁边行进以进行躲避。驻留:个体到达指定位置(工作地、家、比赛场馆)后会进入驻留状态,在该状态下,个体持续静止一段时间且无法被感染。每个个体可能会具有多个候选的行为状态,每个时间步内仅有一个行为状态生效。

2.2 个体分类

为模拟真实城市环境下人群个体的多样性,根据行为模式将个体归为普通人、工作者、观赛者 3 类。普通人:只有唯一的行动状态——随机走动;工作者:拥有追踪、驻留和躲避 3 种候选行动状态。

为模拟真实情况,设定工作者在家和工作地进行驻留,并在两地之间往返追踪;观赛者:拥有全部的候选行为状态:散步、追踪、躲避、驻留。最初时观赛者追踪比赛场馆的位置,到达比赛场馆后驻留观看,在观看结束后离开场馆且行为模式变为随机走动。

图 2a 展示了城市观赛传播模型的大体框架。模拟空间为有限 2 维棋盘,用坐标表示每个棋盘格的空间位置,每个格子仅能容纳一名个体。除黑色方块外的方块为观赛者,三角形为工作者,圆形为普通人。个体的颜色表征了其感染状态(灰色表示未被感染,黑色表示被感染)。

2.3 模拟结果与分析

1) 参数设置。使用 $1\,000 \times 1\,000$ 的二维网格模拟 40 万平方米的区域,并根据北京市主城区人口密度数据在网格空间内随机初始化了 3 000 名个体,其中普通人 1 200 名,工作者 1 800 名,初始位置随机;工作者的工作单位距离采样自北京市人口的平均通勤距离^[4]为参数的泊松分布;观赛场馆根据奥林匹克公园内各场馆(国家体育馆、国家体育场、国家游泳中心)的相对位置放置,每个场馆的观赛人员为 100 个,在每个场馆的观赛人群中随机初始化一个潜伏者作为初始感染个体。对于防控手段的模拟,设置社交间隔会让个体在社交间隔内出现其他个体时做出远离其他个体的行为,而设置口罩覆盖率将使得一定比例的个体被感染的概率下降。

2) 结果与分析。图 3a 展示了在不同的社交间隔水平下疾病的传播速度;图 3b 为口罩覆盖率的变大,疫情的传播速度也随之下降。具体地,将社交间隔从 0 增大至 1 米、从 1 米增大至 2 米、从 2 米增大至 3 米,其感染速率下降百分比分别为:0%、6.3%、25.9%;将口罩覆盖率从 0% 提高到 40%、从 40% 提高到 80%,感染速率分别下降 7.0%、19.2%。可以看到,社交间隔的增大会降低疫情的传播速度,且这种增大在一定范围内存在明显的“边际递增”效应,也即增大相同的距离,“基础距离”越长,提升越明显。对口罩覆盖率也能分析出相同的结论。这种防疫参数与感染比例之

间的非线性关系, 结合国内外疫情状况的对比, 可以发现: 不严格的防疫措施收效甚微; 任何防疫手段其效果随覆盖人群的增加而增加, 且增加速度超过了线性增加速度。

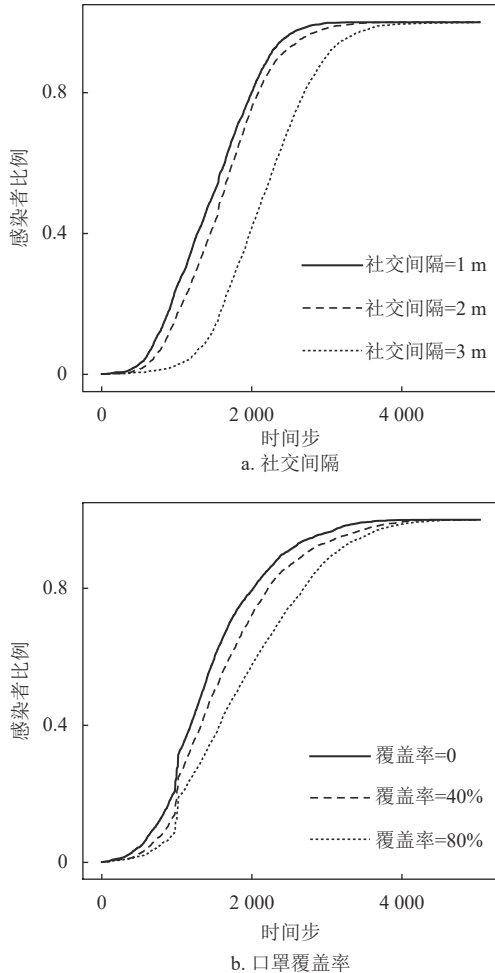


图 3 不同防疫因素下感染者比例随时间步的变化

将两个不同的防疫手段进行对比后发现: 增加社交间隔 (从 2 米增加到 3 米) 比提升口罩覆盖率 (从 40% 提升到 80%) 更加有效, 前者比后者的下降速率大约快 6.7%。这也证实了在公共场合保持与他人一定社交距离、避免与其有肢体接触的重要性^[9]。但这并不代表着口罩防护不重要。在模拟环境中提高社交间隔能如此有效的原因, 不仅基于“病毒的传播能力在阈值距离外随指数下降”这一模型设定, 还因为模拟个体相比真实个体能更加严格地落实“社交间隔为 x 米”这一指令。也即: 在行走途中每时每刻都会“扫描”面前固定范围内是否有其他人, 抑或是存在其他人时总是会远离对方。然而对于现实个体, 这样的行为在现实生活中不可能持续存在。因此, 相比于社交间隔这种受制于个体行为的手段, 通过戴口罩以降低病毒传播能力的方式

似乎更加可靠。

在模拟时发现, 观赛者进场和离场会使得场馆外围的局部人流密度突然增大。对比每个个体带目的性的、独立的进场行为, 比赛结束时人员的集中离场 (图 2c) 以及离场后的随机游走行为更容易使得病毒出现大范围传播。这就要求赛事主办方在比赛结束时采取一些措施控制好离场时的人流密度, 如实行分批离场策略, 在场馆外设置一定范围的警戒区, 禁止人员长时间在此逗留等。

3 奥运村内疾病传播模拟

本文对经典的传染病模型 (SEIR) 加以修改以适配于奥运村内的情况, 并研究了各参数在不同取值时奥运村内的疫情状态。

3.1 模型建立

新冠病毒的传播特性及奥运村的人员接触与原始的 SEIR 模型假设有较大不同。本文修改后的奥运村环境下的 SEIR 传播模型如式 (3) 所示。式中 $S(t)$ 、 $E(t)$ 、 $I(t)$ 分别表示第 t 天奥运村中易感者数量、潜伏者数量和感染者数量; $R(t)$ 表示该天内所有不参与状态转移的人, 包括免疫者、死亡者和被发现后被送入医院的感者; β_1 、 β_2 为潜伏者传播率与感染者传播率; t_0 为响应时间, 表示官方察觉到病毒并加强防疫措施的时间点; $r(t)$ 、 $\gamma(t)$ 分别表示奥运村中每人每日接触的平均人数和卫生检查周期, 两者在响应时间前后有不同的值, 体现了人们在察觉到疫情后的主动防疫手段; $a(t)$ 为易感者的被感染率, 体现了奥运村中的舆情传播对易感者行为的影响; α 表示发病速率。

$$\begin{cases} \frac{dS}{dt} = -\beta_1 r(t) a(t) S(t) \frac{E(t)}{N} - \beta_2 r(t) a(t) S(t) \frac{I(t)}{N} \\ \frac{dE}{dt} = \beta_1 r(t) a(t) S(t) \frac{E(t)}{N} + \beta_2 r(t) a(t) S(t) \frac{I(t)}{N} - \alpha E(t) \\ \frac{dI}{dt} = \alpha E(t) - \gamma(t) I(t) \\ \frac{dR}{dt} = \gamma(t) I(t) \end{cases} \quad (3)$$

3.2 传播结果与分析

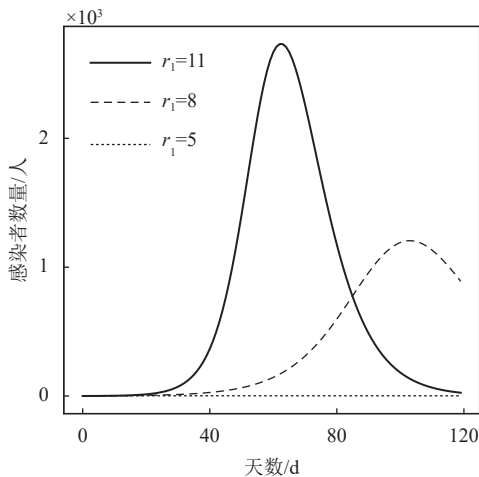
传播实验基于 python3.6。初始时潜伏者数量设置为 1, 且其他人员均未获得免疫能力。这既代表了应对未知病株的一种最差情况, 又能模拟其在奥运村内的传播情形。本文分别研究了奥运村中内的舆情传播、不同隔离强度、检测周期和响应时间对村内疫情传播的影响。根据引发舆情的事件不同, 可将区域内的舆情分为局部舆情和全局舆情, 一般来说, 局部舆情由附近区域的感染事件引发,

而全局舆情与整体的感染规模相关^[9], 本文只关注全局舆情。将全局舆情量化为感染密度 $\rho(t) = I(t)/N$, 并认为全局舆情的传递可以强化村中人员的防疫行为, 则易感者的被感染率为:

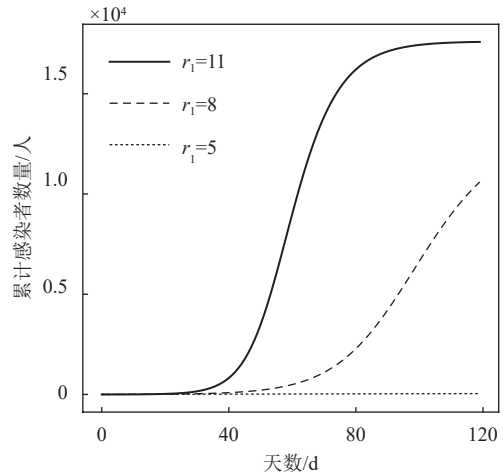
$$a(t) = 1 - c\rho(t) \quad c \in \{0, 1\} \quad (4)$$

式中, 参数 c 是一个开关变量, 取 1 时表示村中存在舆情传播, 否则不存在。本文针对舆情传播不存在的情况下, 即 $c = 0$ 时, 隔离强度、检测周期、响应时间 3 个防疫参数对疫情的影响程度展开讨论, 并讨论区域舆情 ($c = 1$) 对疫情走势的影响。

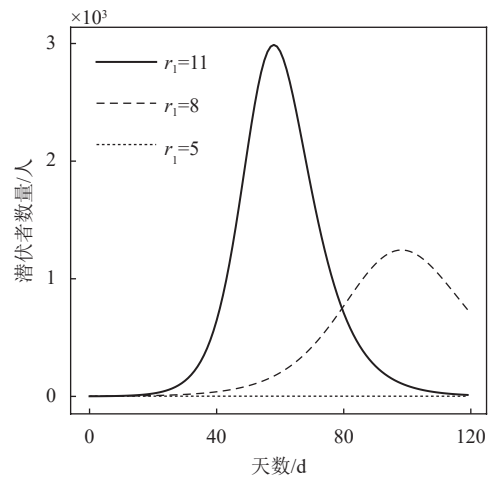
1) 隔离强度。隔离强度反映了奥运村限制出行的程度, 由接触人数 $r(t)$ 衡量。重点关注响应时间后的接触人数 r_1 , 它反映了在知晓病毒存在后官方采取的隔离强度, 取 r_1 的值为 5、8 和 11, 响应时间 $t_0=7$, 反应期后移除速率 $\gamma_1=0.2$ (反应期后检测周期为 5 天), 对应奥运村内的感染者、累计感染者及潜伏者数量如图 4a、4b 及 4c 所示。由图可知, 疾病爆发程度与隔离强度大致呈负相关, 由于初始状态感染人数较少, 在不采取任何加强隔离措施的情况下 ($r_1=11$), 约 68 天的感染者人数达到最高峰; 在隔离程度加强时 ($r_1=8$), 高峰时间点也会相应延迟; 当隔离强度较大时 ($r_1=5$), 其累计感染人数处于一个极低的状态 (120 天时累计感染人数为 200 人)。进一步细化 r_1 的取值 (见图 4d), 即在 60 天的时间内取 r_1 为 4、5、6, 发现在 7 天 (即反应期 t_0) 后, 不同的隔离强度导致了完全不同的感染人数趋势: 当反应期后接触人数大于某个阈值时, 村中感染人数逐渐增加, 疫情呈爆发趋势; 当反应期后接触人数小于该阈值时, 感染人数持续走低, 疫情在很小规模时得到了有效控制。



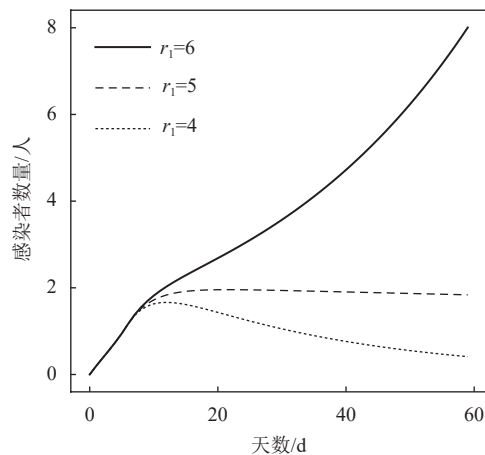
a. 感染者人数随天数变化



b. 累计感染人数随天数变化



c. 潜伏者人数随天数变化



d. 隔离强度较大时, 感染人数随天数变化

图 4 不同隔离强度下奥运村内群体状态

值得注意的是, 奥运村从人员入住到关闭大约 60 天 (冬奥会期间残奥会人员也居住在奥运村内), 由于潜伏期的存在, 其中潜伏者数的变化趋势相比于感染者有 4~5 天的延时。模拟结果显示, 每天潜伏者数量约是感染者的 2 倍, 且在奥运

村闭村时潜伏者的数量也几乎处于顶峰。奥运会结束后, 大量处于潜伏期的人乘坐公共交通回国, 途中并不会显露任何异常, 在毫无防备的情况下将病毒携带至各地, 从而造成新一轮的世界疫情爆发。

2) 检测周期。检测周期即奥运村入住人员接受核酸检测的频率, 由移除速率 $\gamma(t)$ 所衡量。类似于隔离强度, 重点关注响应时间后的移除速率 γ_1 , 其取值为检测周期的倒数, 该值反映了知晓病毒存在后官方对奥运村内人员的检测强度。本文取反应后移除速率 γ_1 的值分别为 0.20、0.33、0.50, 各自对应了反应后 5 天、3 天和 2 天的检测周期。取反应后隔离人数 $r_1=6$ 和 8, 反应期 $t_0=7$, 对应的群体状态变化如图 5 所示, 其中图 5a 对应 $r_1=6$, 图 5b 对应 $r_1=8$ 。观察图 5a, 各时刻取值似乎过小而不符合常理。但仔细分析可知, 纵轴表示“当前时刻奥运村内的感染者数量”, 而非“当前时刻感染者的数量”。同时该情形下隔离强度较大 ($r_1=6$), 并伴有周期性的病毒检测。随着移除速率的增加, 感染人数曲线的走势明显放缓, 类似于隔离强度, 移除速率似乎也决定了疫情的走势。结合图 5b 可知, 高隔离强度和短检测周期能很好地控制疫情。与之相反, 低隔离强度和长检测周期则极易导致疫情失控。从后面的分析中将看到, 疫情的走向不仅与隔离强度和检测周期有关, 还与当前易感者与感染者比例相关。

3) 响应时间。响应时间反映了官方知晓感染者存在并决策(决定隔离和加强检测)的所用时间, 由响应时间 t_0 所衡量。假设在反应期后官方会采取两种防疫态度: 严格防疫态度下, 官方会采取及其严格的隔离措施并缩短排查病毒的时间间隔, 设置参数分别为 $r_1=3$ 、 $\gamma_1=0.333$; 普通防疫态度下, 其只会略微限制奥运村中人员的自由活动和缩短排查病毒的时间, 此时参数分别设置为 $r_1=8$ 、 $\gamma_1=0.250$ 。取响应时间 t_0 的值为 7、11、15, 对应的疫情走势如图 6 所示。

观察图 6a 与图 6b 可知, 改变响应时间并未改变村内总体疾病的传播趋势。也即, 如果隔离强度和检测力度不够, 即便加快对疾病的响应时间, 也不能阻止疾病的爆发。然而, 加快响应时间虽不能改变疫情的总体趋势, 却能大大降低其传播规模。在隔离强度和检测力度足够的情况下, 2 倍的响应时间可使得 60 天后疫情总体规模下降约 6 倍。

通过模拟可以看到, 更严格的隔离、更频繁的

病毒检测能够降低疫情的走势甚至阻断疫情爆发的可能。提高响应时间虽不能改变疫情的走势, 却可以大大减小其规模。故防疫期间, 在保证有效隔离和高效检测的基础上, 决策者需要更快速、更果敢地做出决定。

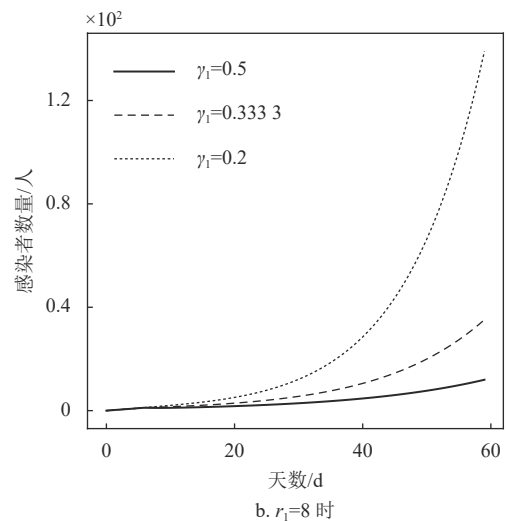
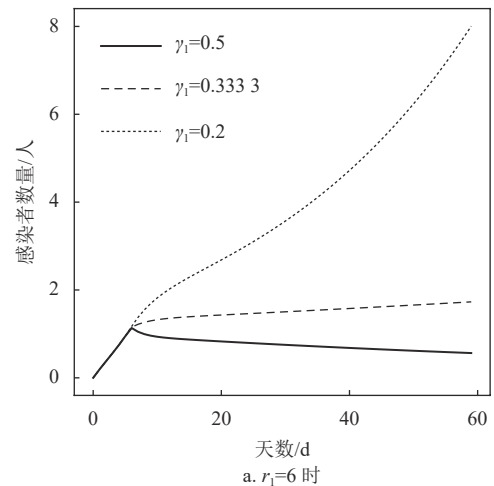
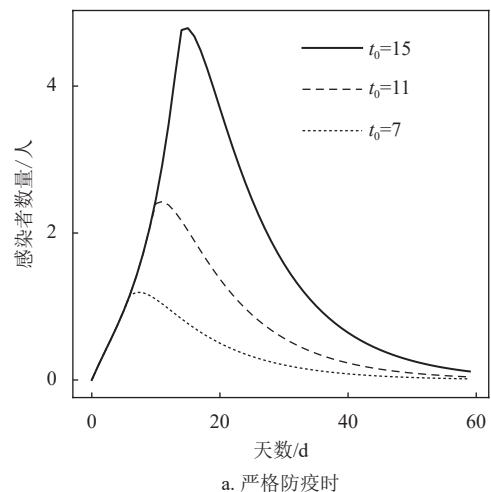


图 5 不同检测周期下奥运村内感染人数随天数变化



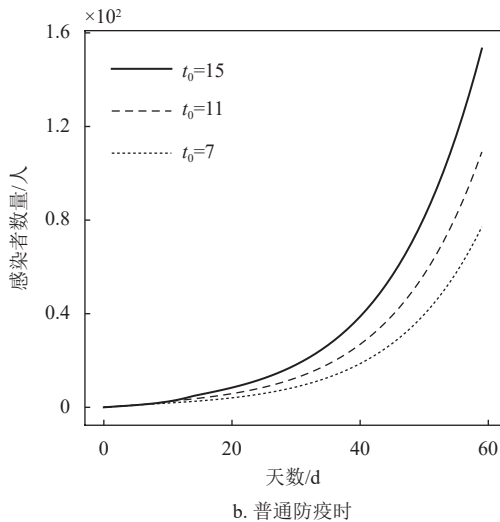


图 6 不同响应时间下奥运村内感染人数随天数变化

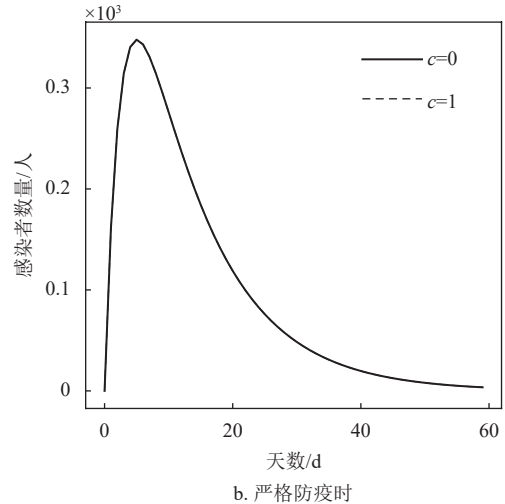
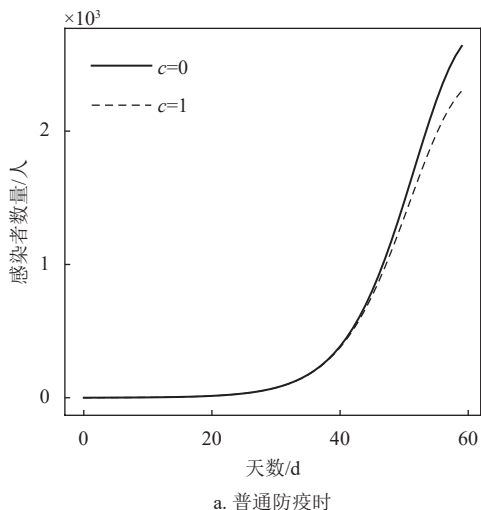


图 7 考虑舆情传播时奥运村内感染人数随天数变化

4) 舆情对疫情的影响。令开关变量 $c = 1$ ，此时奥运村内的疫情规模会影响村中个体的行为：疫情规模的增大会增强个体的防疫意识，在参数上表现个体被感染率 $a(t)$ 的减小 (见式 (4))。为探究舆情传播对整体疫情的影响，分别在参数 $r_1=8$ 、 $\gamma_1=0.250$ 、 $t_0=0$ (普通防疫) 和参数 $r_1=3$ 、 $\gamma_1=0.333$ 、 $t_0=0$ (严格防疫) 下进行模拟，模拟结果如图 7 所示。可以看到，在防疫措施处于较低水平时 (图 7a)，依靠区域内的舆情传播导致的个体行为变化只能减缓疫情的传播速度，而不能改变其趋势。相反，当防疫措施较严格时 (图 7b)，舆情传播所导致的疫情规模变化几乎可以忽略不计。这说明在防疫阶段，提高人们的防疫意识只是减少疫情规模的辅助手段，为了从根本上控制疫情规模，必须采取更强有力的干预措施。



3.3 再生数分析

可见，新冠疫情的爆发与反应时刻后接触人数及移除速率有关。基于式 (2)，在不考虑舆情传播 ($c = 0$) 的情况下推导出 SEIR 奥运村传播模型的基本再生数 R_0 和有效再生数 $R(t)$ 的计算式：

$$R_0 = \left(\frac{\beta_1}{\alpha} + \frac{\beta_2}{\gamma_1} \right) r \tag{5}$$

$$R(t) = R_0 s(t) \tag{6}$$

式 (5) 显示了 R_0 并非 t 的函数，其取值仅与 r_1 、 γ_1 有关，而这两者均反应了 t_0 时刻后的防疫措施强度。若该时刻后的防疫措施足够有力使得 R_0 足够小，则在可预见的时间内，奥运村中的疫情将得到有效控制。

与经典模型类似，SEIR 奥运村传播模型的基本再生数和有效再生数分别描述了疫情是否会爆发以及爆发后疫情的走势，其临界值为 1。具体来说， $R_0 < 1$ 时疾病将趋于衰亡，反之则爆发；在疾病开始传播后，某时刻的 $R(t) < 1$ 将标志着一段时间内感染者数量呈减少趋势，反之则增加。与之不同的是，本模型中的两者都与反应时刻后的防疫参数有关，这能够更好地帮助我们理解各防疫措施对疫情控制的有效性，从而引导舆情向有利的方向发展。最后，在官方不加强病毒排查的情况下，根据基本再生数及传播临界值计算出了东京奥运村的社交人数阈值 $r_1 \approx 4.75$ ，当奥运村中每人每天平均接触人数超过该值时，疫情将会在奥运村中爆发。

4 风险分析

进一步，用长短期记忆模型 LSTM 预测北京

冬奥会各参赛国截止 2022 年 1 月 26 日的疫情走势。根据 LSTM 模型对赛前各参赛国感染人数的预测,将参赛国按赛前的预测感染人数在 0~100、100~1 000、大于 1 000 这 3 个范围内,将其划分为低、中、高 3 个风险等级,划分结果如图 8 所示。其中,中国的赛前感染人数预测值为 23 人,处于低风险等级中的较低段,在 95 个参赛国中风险排名 89 位。为了引导北京冬奥会开赛前以及赛事期间舆情的积极走向、防止社会舆论情绪消极化,预先做好疫情的严格防控是有必要的。因此,北京冬奥会在当前的管控力度下如期举办具有合理性。

此外,美国、巴西、印度等参赛国处于高风险等级的高段。为了更好判定风险的增势,分析了截至 2021 年 7 月 29 日的风险情况,低、中、高风险等级国家分别为 25, 32, 38 个(见参赛国风险评估),占比 26%, 34%, 40%,与截至 2022 年 1 月 26 日的风险分析结果对比,发现 7 月 29 日以后,多国疫情风险普遍有上升的趋势。在城市范围内观赛行为可能引发的疫情传播模拟提醒我们:大型体育赛事的举办更应注重防控中高风险参赛国的人员输入。加强观赛地居民的防疫意识、控制比赛场馆附近的人流密度以及入场和离场时的有序性。

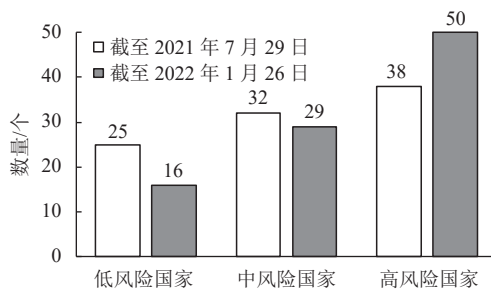


图 8 参赛国风险评估

5 结束语

本文研究了疫情传播与舆情扩散间的相关性。结果表明,全球疫情会在爆发后的一段时间里对日本东京奥运会的相关舆情产生显著影响,即二者之间存在一定的时滞相关性。对于疫情,本文对赛事举办过程中城市的人流活动及疫情传播进行了仿真,仿真结果表明,观赛人群所导致的短时间内人流密度的提升能大大加速疫情的传播;在北京冬奥会能如期举行的前提假设下,本文基于 SEIR 模型以模拟北京奥运村中的疫情传播,呈现了隔离强度、检测周期和响应时间 3 种防控措施及舆情传播

对疫情传播的影响。研究结果表明,这 3 种措施能有效控制奥运村中疫情的传播规模和扩散趋势,而舆情流动对局部疫情走势的影响并不显著;最后,将赛前预测、赛时模拟和疫情爆发的滞后程度相结合,对疫情和舆情的风险等级进行了综合评定。综上所述,本文认为在大型体育赛事举办期间,仅依靠舆情的流动和人们自身的行为无法有效地降低疫情规模、主办方应积极行动,将奥运村的隔离等级保持中等水平(小于 5 人),且具有紧急状况快速响应的能力。鉴于观赛行为导致场馆周围的局部疫情传播及防护措施的失效,建议主办方实行线上观赛策略。

本文研究工作还得到杭州师范大学科研启动经费(2021QDL030)和中央高校基本科研业务费的资助,在此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] 钟秉枢,黄志剑,王凯,等.困境与应对:聚焦新型冠状病毒肺炎疫情影响对体育事业的影响[J].体育学研究,2020,34(2):933-940.
ZHONG B S, HUANG Z J, WANG K, et al. The dilemma and response: Focusing on the impact of COVID-19 on sports[J]. Journal of Sports Research, 2020, 34(2): 933-940.
- [2] 王润斌,李慧林.东京 2020 年奥运会赛事延期交付的多维影响与应对之道[J].体育学研究,2020,34(3):7-18.
WANG R B, LI H L. Multidimensional impacts and countermeasures for the postponed delivery of Tokyo 2020 Olympic Games[J]. Journal of Sports Research, 2020, 34(3): 7-18.
- [3] 张春萍,杨婧怡,向佳兴,等.新冠肺炎疫情对我国体育赛事利益相关者的影响及应对策略[J].北京体育大学学报,2020,43(11):34-41.
ZHANG C P, YANG J Y, XIANG J X, et al. Effects of Covid-19 on sport event stakeholders in China and its countermeasures[J]. Journal of Beijing Sport University, 2020, 43(11): 34-41.
- [4] 叶春明,赵圣文,杨秀红等.基于机器学习的青少年运动员新冠肺炎疫情应对能力分析 with 预测[J].体育学刊,2020,27(3):68-73.
YE C M, ZHAO S W, YANG X H, et al. Analysis and prediction of teenage athletes' ability to cope with the outbreak of COVID-19 based on machine learning[J]. Journal of Physical Education, 2020, 27(3): 68-73.
- [5] 李佳宸,李璐.新冠疫情期间篮球运动员焦虑成因及调节方法探析[J].体育科技文献通报,2020,12:178-180.
LI J C, LI L. An analysis of the causes and strategies to improve anxiety in basketball players during the Novel Coronavirus(2019-nCoV)[J]. Bulletin of Sport Science & Technology, 2020, 12: 178-180.
- [6] WONG A Y Y, LING S K K, LOUIE L H T, et al. Impact of the COVID-19 pandemic on sports and exercise[J]. Asia-

- Pacific Journal of Sports Medicine, Arthroscopy, Rehabilitation and Technology, 2020, 22: 39-44.
- [7] HOANG V T, AL-TAWFIQ J A, GAUTRET P. The Tokyo Olympic Games and the risk of COVID-19[J]. *Current Tropical Medicine Reports*, 2020, 7(4): 126-132.
- [8] ZHU W, FENG J, LI C, et al. COVID-19 risk assessment for the Tokyo Olympic Games[J]. *Frontiers in Public Health*, 2021, 9: 730611.
- [9] WU Q, FU X, SMALL M, et al. The impact of awareness on epidemic spreading in networks[J]. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, 2012, 22(1): 013101.
- [10] GRANELL C, GÓMEZ S, ARENAS A. Dynamical interplay between awareness and epidemic spreading in multiplex networks[J]. *Physical Review Letters*, 111(12): 128701.
- [11] 王成军, 党明辉, 杜骏飞. 找回失落的参考群体: 对沉默的螺旋理论的边界条件的考察[J]. *新闻大学*, 2019(4): 13-29.
WANG C J, DANG M H, DU J F. Bringing back the reference group: The boundary condition of the spiral of silence theory[J]. *Journalism Research*, 2019(4): 13-29.
- [12] ALAZAB M, AWAJAN A, MESLEH A et al. COVID-19 prediction and detection using deep learning[J]. *International Journal of Computer Information Systems and Industrial Management Applications*, 2020, 12(7): 168-181.
- [13] 冉江宇, 付凌峰, 阚长城, 等. 基于通勤大数据的城市职住分离度研究——《2020年全国主要城市通勤监测报告》核心指标分析[J]. *城市交通*, 2020, 5: 10-17.
RAN J Y, FU L F, KAN C C, et al. Urban job-residence separation based on big commuting data: Analysis of core indicators in the 2020 monitoring report on national commuting report for major cities in China[J]. *Urban Transport of China*, 2020, 5: 10-17.
- [14] SUN C, ZHAI Z. The efficacy of social distance and ventilation effectiveness in preventing COVID-19 transmission[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2020, 62: 102390.

编辑 蒋晓