

基于健康码区块链的新型冠状病毒肺炎疫情防控与评估研究

汪涛[†]

(武汉市社会科学院, 武汉 430019)

(E-mail: wangtao69@sina.com)

赵彦云

(中国人民大学统计学院, 北京 100872)

(E-mail: cas-kriu@ruc.edu.cn)

摘要 新型冠状病毒潜伏期可以传染, 以及存在着无症状感染者情况. 这些都给流行病学调查带来巨大挑战. 本文提出一个结合健康码和区块链、建立利用健康码区块链对新型冠状病毒肺炎疫情进行防控模型, 对疫情防控难易程度和成效进行评估. 结合模型和模拟有三个发现, 一是发现疫情中封闭城市对经济社会发展会产生平方效应 (平面叠加效应), 甚至是立体叠加效应, 对经济社会活动带来重大打击; 二是发现防护的作用十分明显, 可以有效地降低了无症状感染者所导致的传染人数; 认为借助健康码链, 可以查找无症状感染者. 三是发现可以对不同区域防控策略进行优化, 认为节点度越高的区域要实行更为严格的防控措施, 农村、中心镇和中心城区应采取不同的防控策略. 文章最后指出健康码链模型具有广泛的应用价值.

关键词 新型冠状病毒肺炎; 健康码; 区块链; 空间联系矩阵

MR(2000) 主题分类 62P10; 15A30

中图分类 R184.6

1 引言

2020 年初在武汉首先爆发的新型冠状病毒肺炎 (COVID-19) 疫情已向全球蔓延, 形成了大流行, 对人类健康生活和全球经济发展带来了重大冲击. 如何正确评估和预判疫情发展, 拿出强有力的应对措施, 成为当前世界各国面临的头等大事. 自疫情爆发以来, 学术界对疫情的评估和防控给予高度关注. 有关研究分为三类, 第一类是对疫情进

本文 2020 年 3 月 20 日收到, 2020 年 4 月 24 日收到修改稿.

[†] 通讯作者.

展进行分析和预测. 对新型冠状病毒的认识、疫情信息的收集、应对手段的提出显然是一个逐步深入过程. 早期研究, 典型代表如英国学者 Read^[1] 等、西安交通大学 Shen^[2] 等、中国香港学者 Wu^[3] 等, 沿用传统模型, 对疫情预测与后来公布的统计数据出入较大. 随着对新型冠状病毒特征, 包括潜伏期可以传染、有些感染者无典型症状、有些治愈者可以转阳等不同于以往病毒的新特征认识, 后来一些研究, 包括喻孜等人^[4], 严阅等人^[5], 张琳^[6], 王霞等人^[7], 李承倬等人^[8], 吉兆华等人^[9], 崔恒建和胡涛^[10] 已经着手将这些新特征加到模型之中, 但目前预测总的来看低估疫情的严重性. 第二类是评估各类应对手段对疫情的影响, 典型研究, 包括李倩等人^[11], 刘武忠等人^[12], 耿辉等人^[13], 金启轩^[14], 曹盛力等人^[15] 等人, 分别评估防疫执行力和居民依从性、复工、隔离制度、社会防控、医学追踪隔离和集中收治等的作用. 这类需要加强综合评估方法及应用的研究. 第三类是探讨各类新兴技术在疫情防控中的应用. 代表性研究包括: 徐萍等人^[16] 探讨利用边缘学习和联邦学习对高校进行防控管理. 胡卿汉等人^[17] 阐述用区块链管理医用防疫紧急物资供应. 黄森忠^[18] 分析大数据技术对于新冠肺炎疾控的作用. 这类研究才刚刚起步.

区块链^[19,20] 作为第四次科技革命中最具颠覆性创新之一, 利用其去中心化、分布式存储、共识机制(集体维护)、数字信任、价值激励、非对称安全加密、透明性、防篡改、可追溯、容错性、智能合约、跨链等诸多优质特性, 已经在战“疫”的慈善捐赠、物资流转、企业复工、社区防疫等方面发挥了重要作用.

从统计数据上看, 可以判断当前国内疫情已经转过“拐点”, 正逐渐步入收敛期. 钟南山估计全球疫情至少延续到 6 月份, 可以预见收敛期将会持续一个较长时间. 正如习近平总书记在统筹推进新冠肺炎疫情防控和经济社会发展工作部署会议上指出, “经济社会是一个动态循环系统, 不能长时间停摆”, 强调要“落实分区分级精准复工复产.” 对于像武汉这样的疫情防控重点地区, 如何做到既要确保疫情防控到位, 又要尽快恢复生产生活秩序, 将是一个巨大挑战. 关键取决于能否对新型冠状病毒的传播和扩散做到全面准确的追溯和把控. 由于新型冠状病毒潜伏期具有传染性, 同时存在着大量无症状感染者, 再加上潜伏期较长, 这些都给流行病学调查带来巨大挑战, 传统模式已经无法有效应对这些新特性. 利用区块链技术, 结合已经推出的健康码, 将创造出一个新的模式, 成为一个强有力的应对手段.

本文创新之处在于提出构建健康码区块链(以下简称健康码链), 建立利用健康码链对新型冠状病毒肺炎疫情进行防控的模型, 并根据模型得到的空间联系矩阵, 结合模拟开展疫情防控与评估的有关研究, 评估封闭对经济社会发展的影响, 分析防护对于疫情防控的作用, 以及优化区域防控的策略.

文章剩余部分结构如下: 第 2 节介绍健康码链的构造, 第 3 节给出基于健康码链的防控模型, 第 4 节结合当今国内疫情防控形势, 开展有关模拟计算与分析, 第 5 节总结并讨论下一步可以开展的工作.

2 健康码区块链的构造

健康码是杭州在全国率先推出的数字化防疫措施。目前, 全国一些地区(包括 100 多个城市)已经推广健康码。健康码采用一人一码, 而且是动态码, 主要包括持有者的基本信息、健康信息, 通常与支付宝或者微信绑定。健康码一般分为绿、黄、红三种颜色。如果持有者曾经与确诊或疑似病例在一起, 或者来自重点疫区, 填写申请表或健康打卡时有身体不适症状等, 都会影响健康码的颜色。绿码, 表示亮码通行; 黄码, 实施 7 天内集中或居家隔离, 连续申报健康打卡超过 7 天正常后, 将转为绿码; 红码, 实施 14 天的集中或居家隔离, 连续申报健康打卡, 将转为绿码。

通过健康码, 可以对持有者健康状态进行追溯, 但这对于战“疫”还是不够的, 还必须对持有者行踪, 尤其与之接触人员进行追溯。要做到这一点, 可以借助区块链。

2.1 健康码链中持有者信息

为了更有效地跟踪疫情, 健康码链中持有者信息(HC_t^i 其中 i 表示持有者编号, t 表示时间), 要比健康码中的信息更丰富。通常可以包括四类信息: 第一类是基本信息, 包括姓名(NM)、性别(SEX)、身份证号(ID)、职业(VC)、居住地(ZF)、工作单位(地)(ZW)。第二类是健康信息, 包括目前健康码中一些已有健康信息及选项, 涉及是否发热、干咳、乏力等健康特征状况(HN), 是否为密切接触者(HS, =0 表示不是, =1 表示是)、是否感染者(HI, =0 表示不是, =1 表示是确诊, =2 表示(自)治愈)。第三类是防护要求信息(P, =0 表示不防护, =1 表示防护)。结合第二类和第三类信息, 定义健康码颜色(见下表)。第四类是扩展信息, 主要是持有者行为信息, 包括能否移动(ZI, =0 表示能移动, =1 表示不能移动), 移动载体(ZC, 采取类型+编号方式), 所到地点(ZM, =ZC_X 表示连续的地址编码), 地点密封特性(ZC, =0 表示不密封, =1 表示密封), 起始时间(ZBT), 终止时间(ZET), 当时个人防护状态(ZP, =0 表示无防护, =1 表示防护), 等等。

表 1 健康码链中健康码颜色定义

健康码颜色	含义
绿色	无任何感染, 可以移动
蓝色	健康有些异常, 但不是确诊病人, 可以移动, 需要防护
黄色	附近有确诊患者(或者确诊治愈并经集中隔离观察正常), 需居家隔离观察
橙色	接触过确诊患者(或者确诊后治愈), 需要集中隔离观察
红色	确诊患者需集中隔离治疗

2.2 健康码链的架构设计

以城市为例, 健康码链可采用基于角色(节点)分级分权的联盟链, 使用应用层、合约层、激励层、共识层、网络层、数据层和数据基础设施层等七层结构。从角色(节点)来看, (1) 市区政府信息部门, 联合特定企业, 负责整个系统分级维护和监管。(2) 市

区卫健部门分级负责系统数据构建、维护和监管。(3) 社会所有场所, 无论是固定的, 还是流动的, 尤其是医院、各类交通枢纽等, 基于健康码的规则, 负责出入人员健康码信息的监测、记载和提交. 通过结合物联网、人工智能和大数据等技术可以实现有关处理的智能化.(4) 每个个体(每天早上)负责自身健康码信息的监测、记录和提交, 身体如有异常, 可随时记录和提交.(5) 有关的企业、金融机构、社会组织、行业协会、研究机构均可以参与相关标准制定和区块链建立. 所有参与主体根据职责和需要, 授予相应管理(查阅)权限. 比如, 个人通过手机上有关 APP 软件, 可以查询将要去的地方是否近期有确诊人员和被封闭等情况, 同样通过手机 APP, 该系统通过智能合约可以向个人发出近一段时间(14 天)内接触过确诊人员、接触地点和时间的警报, 并给出有关防护和隔离要求.

2.3 空间联系矩阵的构造

在健康码链中, 存放着每个持有者每天所到全部地点的有关信息. 通过对这些信息中每人活动地点及有关情况的追溯和统计分析, 可以判断所有持有人与其他人每天在空间上是否发生联系. 将反映这一情况的矩阵, 称为空间联系矩阵.

将空间联系矩阵 (spatial association matrix) 记为 $W_t(ij)$ ¹, 其中 t 表示时间, i 和 j 代表不同持有者.

$$W_t(ij) = \begin{cases} 0, & i \text{ 和 } j \text{ 在第 } t \text{ 天不曾在同一位置} \\ 1, & i \text{ 和 } j \text{ 在第 } t \text{ 天曾在某一时刻出现在同一位置} \end{cases}$$

$W_t(ij) = 1$, 用数学符号表示: $HC_t^i(ZM(k)) = HC_t^i(ZM(g)) = ZC_XXX$ 且满足:

第一种情形, 两者在同一位置时间有交集, 即: $HC_t^i(ZBT(k) \rightarrow ZET(k)) \cap HC_t^j(ZBT(g) \rightarrow ZET(g)) \neq \emptyset$ 或者第二种情形, 所到地点较为封闭, i 离开时间与 j 达到时间不到 3 小时, 即: $ZC(ZC_XXX) = 1, HC_t^i(ZET(k) + 3) \geq HC_t^j(ZBT(g))$ ², 其中, k 和 g 分别表示 i 和 j 在第 t 天空间移动第某次. 另外, 假定 $W_t(ii) = 1$.

上述空间联系矩阵, 并没有考虑到所有人当时实际的防护状态. 下面, 将 WH_t 定义为考虑防护状态的空间联系矩阵:

$$W_t(ij) = \begin{cases} 0, & W_t(ij) = 0 \text{ 及 } W_t(ij) = 1, \text{ 当时 } i \text{ 和 } j \text{ 至少一方防护,} \\ 1, & W_t(ij) = 1, \text{ 但当时均没有防护.} \end{cases}$$

另外, 根据第 t 天 i 的防护状态, 决定 $WH_t(ii) = 1$ (无防护) 或者 0(有防护).

2.4 防控与评估

通过对 W_t 动态序列的分析, 可以从主体联系角度评估疫情对经济社会发展的影响.

假定全部持有者的数量为 n , $W_t(ij)$ 同时也记为 $W_{(n \times n)}$.

¹ $W_t(ij)$ 中 i 和 j 的摆布可以依据他们所处地区的某种空间位置为参照. 比如, 以居住空间位置为参照.

² 新型冠状病毒存在气溶胶传播, 本文假定在一个封闭环境中病毒可以成活 3 小时.

定义 CD 为空间位置联系平均值, 从个体联系角度反映经济社会联系活跃度. 即:

$$CD(W_t) = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=0}^n W_t(ij)}{n * n}.$$

通过对 WH_t 和 $CD(W_t)$ 动态序列的分析, 可以从主体联系角度评估疫情进展.

定义 PD 为考虑防护状态的空间位置联系平均值, 从个体联系角度反映疫情防控难度, 即:

$$PD(WH_t) = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=0}^n WH_t(ij)}{n * n}.$$

通过对 WH_t 和 $PD(WH_t)$ 动态序列的分析, 可以从主体联系角度评估疫情防控的成效.

结合上述指标, 不仅可以对整个地区 (或者城市) 疫情进展、疫情对经济社会发展影响、疫情防控成效进行评估, 而且可以对地区内各个区域之间的疫情进展、疫情对经济社会发展影响、疫情防控成效等进行比较分析, 并对下一步各区疫情的防控给出有针对性的策略.

3 模型与方法

根据健康码链对疫情进行防控, 主要利用健康码链对每个个体健康状况、空间位置状态和防护状态进行跟踪监测来进行的, 其基本原理见下图³.

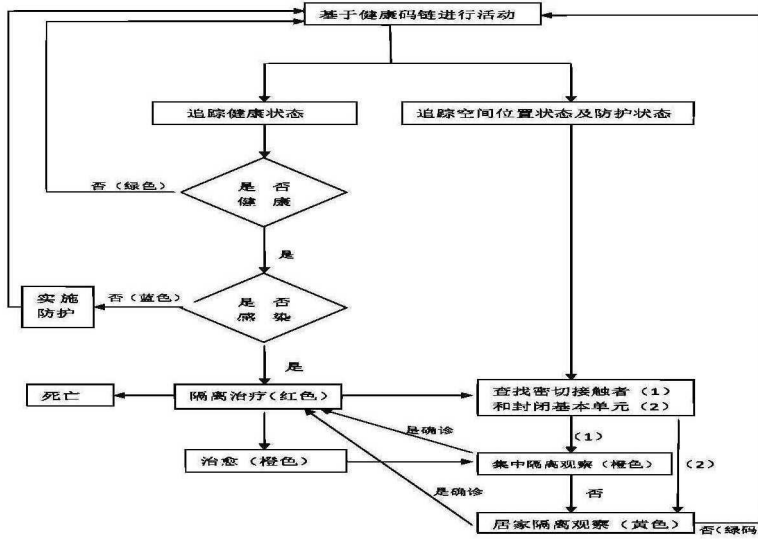


图 1 利用健康码链的疫情防控模型

³ 该模型假定没有新进入者, 结合目前北京等地做法, 对新进入者采取集中隔离观察或者居家隔离观察, 对整个地区疫情影响并不大.

表 2 模型中一些关键步骤及其主要做法、有关算法一览表

模型中步骤	主要做法	有关算法
跟踪健康状态		
是否健康异常	方法 1: 个体每天早上自查上报, 其他时间发现异常及时上报 方法 2: 每个场所出入口监测	if $HC_t^j(HN) \geq 1$ and $HC_t^j(HI) = 0$ $HC_t^j(P) = 1$
是否感染疾病	如果确诊, 集中隔离治疗.	$HC_t^j(HI) = 1$ $HC_t^j(ZI) = 1$ $W_t(jj) = WH_t(jj) = 0$ 对 $\forall l, W_{t+1}(lj) = W_{t+1}(jl) = 0$ $WH_{t+1}(lj) = WH_{t+1}(jl) = 0$
追踪空间位置状态 及防护状态		
查找密切接触者, 集中隔离观察	对近 14 天以来该确诊患者的所有密切接触者 进行集中隔离观察	查找所有 q $WH_{t-d}(jq) = 1, d = 0, 1, \dots, 14$ 使得: $HC_{t+1}^q(HS) = 1$ $HC_{t+1}^q(P) = 1$ $HC_{t+1}^q(ZI) = 1$ 对 $\forall l$, 使得 $W_{t+1}(lq) = W_{t+1}(ql) = 0$ $WH_{t+1}(lq) = WH_{t+1}(ql) = 0$
封闭基本单元	对确诊病人所在基本单元 A (含居住地和 工作地) 进行封闭, 所有在此单元内 人进行居家隔离观察, 所有进入该单元 内必须防护	对 $\forall r \in Z(A)$, $HC_{t+1}^r(P) = 1$ $HC_{t+1}^r(ZI) = 1$ 对 $\forall l$, 使得 $W_{t+1}(lr) = W_{t+1}(rl) = 0$ $WH_{t+1}(lr) = WH_{t+1}(rl) = 0$ 对 $\forall v$ 进入 $Z(A)$, 即 $HC_{t+1}^v(ZM(k)) = Z(A)$ 有: $HC_{t+1}^v(ZP(k)) = 1$
确诊病人治愈后, 集中 隔离观察和居家 隔离观察正常	确诊病人治愈后, 集中隔离观察 14 天 和居家隔离观察 14 日均正常, 进入正常生活	进入正常生活, 即: $HC_{t+1}^j(HI) = 2$ $HC_{t+1}^j(P) = 0$ $HC_{t+1}^j(ZI) = 0$

4 模拟计算与方法

4.1 封闭影响

目前, 封城已经成为世界各国应对疫情的普遍手段. 如果为了防止疫情的扩散而采取封闭措施, 尤其是采取封城这种极端措施会给这个城市的经济社会发展带来重大打击. 下面模拟封闭措施对城市的影响.

假设这个城市处于发达阶段, 首先来考察一种极端情况, 这个城市中每天任何两个

人都发生联系, 即 $W_t(ij) = 1^4$, 所得到的空间位置矩阵:

$$W_t = \begin{vmatrix} 1 & \cdots & 1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & \cdots & 1 \end{vmatrix}_{n \times n}$$

这时的 $CD(W_t)$ 等于 1.

现假定将实施 k 程度的隔离 (k 大于 0, 小于 1), 对于涉及到的个体, 其与其他个体联系均中断, 即在空间位置矩阵中, 其所在主对角线上的数据, 以及其所在的行和列上的所有数据均等于 0. 由此, 计算新的⁵

$$CD(W_{t+1}) = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{nk} (2(n-i+1) - 1)}{n * n}$$

表 3 给出个体不同数量规模和封闭不同程度下的 CD 取值. 比如, 对于 1 千万人口的城市, 当只有百分之一人口隔离, 人口活跃度相对于原来的 98%, 当 10% 人口隔离时, 活跃度只有原来的 81%, 当 50% 的隔离时, 只有原来的四分之一, 当 90% 的隔离时, 只有原来的 1%. 这说明封闭产生一个平方效应, 即:

$$CD(W_{t+1}) \sim (1 - k)^2$$

这主要归于假设空间位置矩阵是在一个平面上. 如果将立体也纳入到空间位置考虑范畴, 那么意味着封闭不再是一个平方效应或者平面叠加效应, 而是一个立体叠加效应, 封闭带来的危害将更大.

表 3 个体不同数量规模和封闭不同程度下的 CD 取值一览表

n/k	0.01	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	0.99
10	0.9711	0.8100	0.6500	0.5100	0.3900	0.2900	0.2100	0.1500	0.1100	0.0900	0.0891
100	0.9801	0.8109	0.6419	0.4929	0.3639	0.2549	0.1659	0.0969	0.0479	0.0189	0.0099
1000	0.9801	0.8109	0.6419	0.4929	0.3639	0.2549	0.1659	0.0969	0.0479	0.0189	0.0099
10000	0.9801	0.8100	0.6400	0.4900	0.3600	0.2500	0.1601	0.0901	0.0401	0.0101	0.0002
100000	0.9801	0.8100	0.6400	0.4900	0.3600	0.2500	0.1600	0.0900	0.0400	0.0100	0.0001
1000000	0.9801	0.8100	0.6400	0.4900	0.3600	0.2500	0.1600	0.0900	0.0400	0.0100	0.0001
5000000	0.9801	0.8100	0.6400	0.4900	0.3600	0.2500	0.1600	0.0900	0.0400	0.0100	0.0001
10000000	0.9801	0.8100	0.6400	0.4900	0.3600	0.2500	0.1600	0.0900	0.0400	0.0100	0.0001

当然, 互联网的出现, 可以在一定程度上有效化解实体空间隔离带来的不利影响.

通常实际生活中不可能出现每个个体都与其他个体在每天发生联系. 人们的职业和年龄往往决定着其与其他人联系方式和联系数量. 不失一般性, 假定每个人每天联系 100 人, 城市人口为 1 千万人, 那么定义 CD_0 作为考察封闭作用的基准活跃度:

⁴ 这实际上反映当时间趋于无穷大之后, 城市中每个人与其他人通过直接或者间接方式都存在某种联系.

⁵ 如果 nk 不为整数, 则取 $[nk]$.

$CD_0 = \frac{1}{10^5}$. 同样假定实施 k 程度的隔离, 所得到的矩阵为:

$$\begin{vmatrix} W_{kn*kn} & W_{kn*(1-k)n} \\ W_{(1-k)n*kn} & W_{(1-k)n*(1-k)n} \end{vmatrix}$$

定义 CD_1 作为考虑封闭作用下的联系活跃度:

$$CD_1 = \frac{10^2 * 10^7 - (10^2 * k * 10^7 * 2) - S(W_{kn*kn})}{10^7 * 10^7},$$

其中 $S(W_{kn*kn})$ 表示 W_{kn*kn} 分块矩阵中数值等于 1 之和.

定义 BF 为封闭因子, 等于 $\frac{CD_1}{CD_0}$, 反映封闭带给联系的负面作用.

下面, 分析最坏情况和最好情况,

(1) 最坏情况:

$$\begin{vmatrix} W_{kn*kn} & W_{kn*(1-k)n} \\ W_{(1-k)n*kn} & W_{(1-k)n*(1-k)n} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1_{kn*kn} & 99_{kn*(1-k)n} \\ 99_{(1-k)n*kn} & 1_{(1-k)n*(1-k)n} \end{vmatrix},$$

$$CD_1 = \frac{1-k}{10^7}, \quad BF = \frac{CD_1}{CD_0} = \frac{1-k}{100}.$$

(2) 最好情况:

$$\begin{vmatrix} W_{kn*kn} & W_{kn*(1-k)n} \\ W_{(1-k)n*kn} & W_{(1-k)n*(1-k)n} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 99_{kn*kn} & 1_{kn*(1-k)n} \\ 1_{(1-k)n*kn} & 99_{(1-k)n*(1-k)n} \end{vmatrix},$$

$$CD_1 = \frac{100 - 101 * k}{10^7}, \quad BF = \frac{CD_1}{CD_0} = \frac{100 - 101 * k}{100}.$$

通过对 K 的模拟计算 (见表 4), 不难看出, 封闭越严格, 带给经济社会联系活度的影响是越大的. 当封闭达到 95% 时, 就是最好情况下, 人口活跃度也不到原来的 5%.

表 4 不同情况下 BF 数值一览表

k	0.01	0.05	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	0.95	0.99
最坏情况 (%)	0.99	0.95	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0.05	0.01
最好情况 (%)	98.99	94.95	89.9	79.8	69.7	59.6	49.5	39.4	29.3	19.2	9.1	4.05	0.01

4.2 防护作用

通常没有防护情况下, 病毒基本再生率 $R_0 = W\beta D$ (其中 W 表示传染者平均接触人数, β 为平均传染率, D 为平均传染时间). 对于新型冠状病毒, 假定每天平均接触人数为 100, 中国与世卫组织报告认为传染率在 [1%, 5%] 之间^[21], 假定为平均传染率 3%, 平均潜伏期为 5-6 天^[21], 假定潜伏期最后 2 天 (即第 5 天和第 6 天) 具有传染性^[22], 在一个新型冠状病毒病人发病之初其 R_0 已等于 6^6 .

[24] 估计无症状者占比为 22% 左右, [25] 发现无症状者与有症状者的病毒载量相似. 从目前国内疫情防控形势来看, 未来防控的重点除了应对国外输入, 主要是在复工复产、恢复经济社会秩序过程中对无症状者传播的防控.

⁶ 在本文第一作者与复旦大学等单位学者合作完成的工作论文 ([23]) 发现武汉早期 R_0 已达 6.66.

这里分析防护对于无症状者转播的作用. 假定所有人每天平均接触 100 人, 每个人(含无症状者以及被无症状者传染的下一代传染者)被传染后第五天开始病毒传播, 实际平均传染率等于平均传染率乘以 $(1 - \text{平均防护率})$. 表 5 给出到无症状者传播第 5 天(即被无症状者传染的第一代传染者开始传播), 第 7 天(即第一批第一代传染者开始发病)不同防护情况下累积感染人数与无防护情况下之比. 从表中不难看出, 防护的作用十分明显, 有效地降低了传染人数. 当平均防护率达到 0.9 时, 第 5 天累计感染人数只相当于无防护的 6.63%. 不仅如此, 利用区块链的可追溯特性, 通过对健康码链中无症状所导致的第一批第一代被感染者接触人的行为记录回溯, 在发病 7 天前及其前后接触人的交集就可能是无症状者, 由此可锁定无症状者.

表 5 不同防护情况下与无防护相比累计感染人数占比表

平均防护率 (%)	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
第 5 天 (%)	6.63	74	62.13	51	40.63	31	22.13	14	6.63
第 7 天 (%)	4.94	71	58.19	46.5	35.94	26.5	18.19	11	4.94

4.3 区域防控

利用健康码链所得到的 WH_t , 可以对一个地区不同区域疫情防控进行优化. 下面, 假设一个地区, 有 3 个区域 (ABC) 组成, 其中 A 区域由 1 和 2 两个子区域组成, B 区域由 3 和 4 两个子区域组成, C 区域由 5 和 6 两个子区域组成, 根据健康码链所得到的 WH 矩阵见下面, 其中凡是有下标的分块矩阵各项不全为 0.

$$\begin{pmatrix} WH_{11} & WH_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ WH_{21} & WH_{22} & WH_{23} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & WH_{32} & WH_{33} & WH_{34} & WH_{35} & WH_{36} \\ 0 & 0 & WH_{43} & WH_{44} & WH_{45} & WH_{46} \\ 0 & 0 & WH_{53} & WH_{54} & WH_{55} & WH_{56} \\ 0 & 0 & WH_{63} & WH_{64} & WH_{65} & WH_{66} \end{pmatrix}$$

如果将该地区中 6 个子区域视为网络节点, 从 WH 矩阵中不难看出子区域 3 的节点度为 4, 最高, 其次是子区域 4、5、6 的节点度均为 3, 子区域 2 为 2, 子区域 1 为 1, 最小. 从城市角度来看, 结合子区域方位和功能, A 区域相当于城市的远城区(或者新城区), 子区域 1 相当于其中的农村或者小城镇, 子区域 2 相当于其中的中心镇, B 和 C 区域相当于中心城区, 其中 B 比 C 在城市中中心地位更突出. 通常节点度越高的区域, 其经济社会联系的人口活跃度越大, 防护难度也越大. 不同区域出现新的疫情, 根据其在 WH 矩阵中的表现需要采取不同策略.

(1) 当子区域 1 出现新的疫情时, 不仅子区域 1 需要采取封闭措施, 而且子区域 2 也要采取相应的封闭措施, 以隔断病毒对区域 B 和 C 的传播.

(2) 当子区域 2 出现新的疫情时, 不仅子区域 2 需要采取封闭措施, 而且子区域 1 和 3 也要采取相应的封闭措施, 以隔断病毒对子区域 4、5 和 6 的传播.

(3) 当子区域 4 或者 5 或者 6 出现新的疫情时, 区域 B 和 C 均需要采取封闭措

施,以隔断病毒对区域 A 的传播.

(4) 当子区域 3 出现新的疫情时,该区域需要采取相对严格的封闭措施,同时,子区域 2, 4, 5, 6 也都要采取相应的封闭措施.

5 总结与讨论

本文提出一个结合健康码和区块链、建立健康码链对新型冠状病毒肺炎疫情进行防控的模型. 利用该模型所得到的空间联系矩阵可以评估封闭对经济社会发展的影响,模拟研究发现封闭会产生平方效应(平面叠加效应),甚至是立体叠加效应,对经济社会活动带来重大打击. 同样利用空间联系矩阵还可以用来分析防护的作用,通过对无症状感染者传染模拟,发现防护的作用十分明显,可以有效地降低无症状感染者所导致的传染人数. 不仅如此,借助健康码链可以查找无症状感染者. 利用该模型所得到的考虑防护情况的空间联系矩阵可以对疫情防控难易程度和成效进行评估,对不同区域防控策略进行优化,认为节点度越高的区域要实行更为严格的防控措施,农村、中心镇和中心城区应采取不同的防控策略.

本文不足之处在于没有给出一个健康码链的具体实例或者实验模拟. 本文认为利用健康码链模型进行深化研究,具有广泛的应用价值. 至少体现为三个方面:一是将健康码颜色区分更加细致,比如,将确诊者有关情况加入到颜色划分之中,可以跟踪轻症、微重、重症患者治疗及治愈后信息,展开有关研究. 二是将健康码区块链平台,与征信等网络信息平台进行对接,可以探索建立以人为中心的互联网数字化服务大平台. 三是健康码链为流行病模型提供更高频、可追溯的数据,将推动流行病模型的研究和功能扩展,有助于更细致地分析流行病传染机制. 这些都将成为下一步研究重点.

参 考 文 献

- [1] Jonathan M Read, Jessica R E Bridgen, Derek A T Cummings, Antonia Ho, Chris P Jewell. Novel coronavirus 2019-nCoV: early estimation of epidemiological parameters and epidemic predictions. MedRxiv, 2020
- [2] Shen M W, Peng Z H, Xiao Y N, Zhang L. Modelling the epidemic trend of the 2019 novel coronavirus outbreak in China. bioRxiv. 2020
- [3] Wu J T, Leung K, Leung G M. Nowcasting and forecasting the potential domestic and international spread of the 2019-nCoV outbreak originating in Wuhan, China: a modelling study. *Lancet*, 2020, 395(10225): 689–697
- [4] 喻孜, 张贵清, 刘庆珍, 吕忠全. 基于时变参数 -SIR 模型的 2019-nCoV 疫情评估和预测. 电子科技大学学报, 2020-02-10
(Yu Z, Zhang G Q, Liu Q Z, L Q. The Outbreak Assessment and Prediction of 2019-nCoV Based on Time-Varying SIR Model. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2020-02-10)

- [5] 严阅, 陈瑜, 刘可伋, 罗心悦, 许伯熹, 江渝, 程晋. 基于一类时滞动力学系统新型冠状病毒肺炎疫情的建模和预测. *中国科学: 数学*, 2020, 50(3): 1-8
(Yan Y, Chen Y, Liu K J, Luo X Y, Xu B X, Jiang Y, Cheng J. Modeling and prediction for the trend of outbreak of NCP based on a time-delay dynamic system. *Scientia Sinica Mathematica*, 2020, 50(3): 1-8)
- [6] 张琳. 新冠肺炎疫情影响的一般增长模型拟合与预测. *电子科技大学学报*, 2020-02-21
(Zhang L. Fitness of the Generalized Growth to the 2019 Novel Coronavirus Data. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2020-02-21)
- [7] 王霞, 唐三一, 陈勇, 冯晓梅, 肖燕妮, 徐宗本. 新型冠状病毒肺炎疫情影响下武汉及周边地区何时复工? 数据驱动的网络模型分析. *中国科学: 数学*, 2020, 50: 1-10
(Wang X, Tang S Y, Chen Y, Feng X M, Xiao Y N, Xu Z B. When will be the resumption of work in Wuhan and its surrounding areas during COVID-19 epidemic? A data-driven network modeling analysis. *Scientia Sinica Mathematica*, 2020, 50: 1-10)
- [8] 李承倬, 武文韬, 潘振宇, 邓玉皎, 李筱, 代志军, 吕军. 基于 SIR 模型和基本再生数的浙江省新型冠状病毒肺炎防控效果分析. *浙江医学*, 2020-02-26
(Li C G, Wu W T, Pan Z Y, Deng Y J, Li X, Dai Z J, LV J. Prevention and control of corona virus disease 2019 in Zhejiang province based on SIR model and R_0 . *Zhejiang Medical Journal*, 2020-02-26)
- [9] 吉兆华, 陆振华, 刘昆, 宋姝璇, 邵中军. 全国新型冠状病毒肺炎发病情况室模型分析及疫情进展短期预测. *热带医学杂志*, 2020-02-27
(Ji Z H, Lu Z H, Liu K, Song S X, Shao Z J. SIR Model Analysis and Short-Term Prediction of Epidemic Progress of Coronavirus Disease 2019 in China. *Journal of Tropical Medicine*, 2020-02-27)
- [10] 崔恒建, 胡涛. 新型冠状病毒肺炎预测预报的非线性回归方法. *中国科学 数学*, 2020, 50: 1-12
(Cui H G, Hu T. Nonlinear regression in COVID-19 forecasting. *Scientia Sinica Mathematica*, 2020, 50: 1-12)
- [11] 李倩, 唐彪, WU Jianhong, 肖燕妮, 唐三一. 缓疫策略执行力与依从性对 COVID-19 后期疫情及复工影响的模型研究. *陕西师范大学学报 (自然科学版)*, 2020.01
(Li Q, Tang B, Wu J H, Xiao Y N, Tang S. Mathematical model reveals the influence of execution and adherence of mitigation strategies on the later period of COVID-19 and resumption of work. *Journal of Shaanxi Normal University (Natural Science Edition)*, 2020.01)
- [12] 刘武忠, 王祖兵, 张雪涛, 黄沪涛, 谢静, 朱超强. 复工复产用人单位新型冠状病毒肺炎关键风险点评估. *职业卫生与应急救援*, 2020.03
(Liu W Z, Wang Z B, Zhang X T, Huang H T, Xie J, Zhu C C. Evaluation of novel coronavirus pneumonia critical risk points for resumed and resumed labor units. *Occupational Health and Emergency Rescue*, 2020.03)
- [13] 耿辉, 徐安定, 王晓艳, 张勇, 尹小妹, 马茂, 吕军. 基于 SEIR 模型分析相关干预措施在新型冠状病毒肺炎疫情中的作用. *暨南大学学报 (自然科学与医学版)*, 2020.02
(Geng H, Xu A D, Wang X Y, Zhang Y, Yin X M, Ma M, LV J. Analysis of the role of current prevention and control measures in the epidemic of new coronavirus based on SEIR model. *Journal*

- of Jinan University* (Natural Science & Medicine Edition), 2020.02)
- [14] 金启轩. 中国新冠肺炎疫情预测建模与理性评估. *统计与决策*, 2020.02
(Kim K H. Novel coronavirus pneumonia epidemic prediction modeling and rational evaluation in China. *Statistics & Decision*, 2020.02)
- [15] 曹盛力, 冯沛华, 时朋朋. 修正 SEIR 传染病动力学模型应用于湖北省 2019 冠状病毒? -COVID-19) 疫情预测和评估. *浙江大学学报 (医学版)*, 2020,
<http://kns.cnki.net/kcms/detail/33.1248.R.20200303.1722.004.html>
(CAO Shengli, FENG Peihua, SHI Pengpeng. Study on the epidemic development of corona virus disease-19 (COVID-19) in Hubei province by a modified SEIR model. *J. Zhejiang Univ. (Med. Sci.)*, 2020, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/33.1248.R.20200303.1722.004.html>)
- [16] 徐萍, 何家俊, 岳小尧. 基于边缘学习和联邦学习的新冠肺炎 (COVID-19) 高校防控管理模型研究. *当代教育论坛*, 2020.02
(Xu P, He J J, Yue X Y. COVID-19 University Prevention and Control Management Model Based on Edge Learning and Federal Learning. *Forum on Contemporary Education*, 2020.02)
- [17] 胡卿汉, 何娟, 董青. 区块链架构下医用防疫紧急物资供应信息管理研究 - 以我国新型冠状病毒肺炎防疫物资定向捐赠为例. *卫生经济研究*, 2020.02
(Hu Q H, He J, Dong Q. Research on Emergency Materials Supply Information Management of Medical Epidemic Prevention under Blockchain Architecture-Targeted Donation of COVID-19 Prevention Materials as an Example. *Health Economics Research*, 2020.02)
- [18] 黄森忠. 大数据驱动下的新冠肺炎疾控. 南开大学统计与数据科学学院,
<https://web.stat.nankai.edu.cn/ZYRC>.
(Huang S Z. Novel coronavirus Pneumonia Control under big data. Nankai University School of statistics and data science, <https://web.stat.nankai.edu.cn/ZYRC>)
- [19] Nakamoto S. Bitcoin: a peer-to-peer electronic cash system. <http://bitcoin.org/bitcoin.pdf>
- [20] National Institute of Standards and Technology (NIST). Blockchain Technology Overview.
<http://wemedia.ifeng.com/75063140/wemedia.shtml>
- [21] 中国 - 世界卫生组织新型冠状病毒肺炎 (COVID-19) 联合考察报告.
<http://www.chinanews.com/gn/2020/02-29/9108768.shtml>
(China-WHO novel coronavirus pneumonia (COVID-19) joint investigation report.
<http://www.chinanews.com/gn/2020/02-29/9108768.shtml>)
- [22] 孙倩莱, 李作超, 谭夏林, 蒋永林, 陈伯中, 李谋壹, 肖琦, 徐善松, 方虹英, 吴青春, 杨浩, 黄超洋, 罗垲炜, 何方玲, 胡世雄, 高立冬. 一起新型冠状病毒肺炎聚集性疫情调查. *实用预防医学*, 2020.03
(Sun Q L, Li Z C, Tan X L, Jiang Y L, Chen B Z, Li M Y, Xiao Q, Xu S S, Fang H Y, Wu Q C, Yang H, Huang C Y, Luo C W, He F L, Hu S X, Gao L D. A clustering epidemic of pneumonia caused by 2019-nCoV. *Practical Preventive Medicine*, 2020.03)
- [23] Jiang S, Li Q Y, Li C Q, He X M, Wang T, Li H, Corpe C, Zhang X Y, Xu J Q, Wang J. Mathematical models for devising the optimal SARS-CoV-2 eradication in China, South Korea, Iran, and Italy. Shanghai Public Health Clinical Center, Fudan University. 2020,03

- [24] 黄森忠, 彭志行, 靳祯. 新型冠状病毒肺炎疫情防控策略研究: 效率评估及建议. *中国科学: 数学*, 2020, 50: 1–14
(Huang S Z, Peng Z H, Jin Z. Studies of the strategies for controlling the COVID-19 epidemic in China: Estimation of control efficacy and suggestions for policy makers. *Scientia Sinica Mathematica*, 2020, 50: 1–14)
- [25] Zou L R, Ruan F, Huang M X, Liang L J, Huang H T, Hong Z S, Yu J X, Kang M, Song Y C, Xia J Y, Guo Q F, Song T, He J F, Yen H L, Peiris M, Wu J. SARS-CoV-2 Viral Load in Upper Respiratory Specimens of Infected Patients. *The New England Journal of Medicine*, 2020, 382: 1177–1179

Prevention, Control and Evaluation of COVID-19 Epidemic based on Health-code Blockchain

WANG TAO[†]

(Wuhan Academy of Social Sciences, Wuhan 430019, China)

([†]E-mail: wangtao69@sina.com)

ZHAO YANYUN

(School of Statistics, Renmin University of China, Beijing 100872, China)

(E-mail: cas-kriu@ruc.edu.cn)

Abstract In this paper, we try to solve the challenge of COVID-19 epidemic prevention and control brought by infectivity in incubation period and asymptomatic infections. A COVID-19 epidemic prevention and control model is developed by using health-code blockchain. The spatial association matrix is used to assess the difficulty and effectiveness of epidemic prevention and control. Combined with the model and simulation, there are three findings: first, it is found that the closed city in the epidemic will have a square effect (plane superposition effect) on the economic and social development, or even a three-dimensional superposition effect, which will bring a major blow to economic and social activities. Second, it is found that the protective effect is very obvious, which can effectively reduce the number of infectious persons caused by asymptomatic infections. It is believed that with the help of the health-code blockchain, we can find asymptomatic infections. Third, it is found that the prevention and control strategies of different regions can be optimized. It is believed that the higher the node degree, the more strict the prevention and control measures should be implemented in the regions, and different prevention and control strategies should be adopted in the rural areas, central towns and central urban areas.

Key words COVID-19; health-code; blockchain; spatial association matrix

MR(2000) Subject Classification 62P10; 15A30

Chinese Library Classification R184.6