

开题报告

修格致

2020 年 1 月 31 日

目录

Chapter 1

选题背景

2020 年一月，新型冠状病毒 2019-nCoV 流感在武汉开始肆虐，并迅速传遍全国。该事件映射出大城市在面对突发灾害时，应对能力之差，以及公共应对措施的匮乏。城市政策应该是规模、密度、形态三位一体的 [?]。如何更好地理解城市在面对突发情况时合理的宏观应对措施，应是每个有地理学思维人的共同问题。历史上，天花、黑死病、痢疾、霍乱等瘟疫都留下了惊人的死亡数字。而近期的 SARS、禽流感、H1N1 等疾病的流行也引起了世人的恐慌。公元前 1100 多年前，印度或埃及出现急性传染病天花。公元前 3 前 2 世纪，印度和中国流行天花。公元 165 180 年，罗马帝国天花大流行，1/4 的人口死亡。6 世纪，欧洲天花流行，造成 10% 的人口死亡。17、18 世纪，天花是欧洲最严重的传染病，死亡人数高达 1.5 亿。19 世纪中叶，中国福建等地天花流行，病死率超过 1/2。1900 1909 年，俄国因天花死亡 50 万人。霍乱于 1817 年首次在印度流行，1823 年传入俄国，1831 年传入英国。19 世纪初至 20 世纪末，大规模流行的世界性霍乱共发生 8 次。1817 1823 年，霍乱第一次大规模流行，从“人类霍乱的故乡”印度恒河三角洲蔓延到欧洲，仅 1818 年前后便使英国 6 万余人丧生。1961 年出现第七次霍乱大流行，始于印度尼西亚，波及五大洲 140 多个国家和地区，报告患者逾 350 万。1992 年 10 月，第八次霍乱大流行，席卷印度和孟加拉国部分地区，短短 2 3 个月就报告病例 10 余万，死亡人数达几千人，随后波及许多国家和地区。疟疾每年在全球有五亿宗病例，导致超过 100 万人死亡，大部份在非洲发生。世界卫生组织指出疟疾平均每 30 秒杀死一个 5 岁以下的儿童；疟疾也是导致非洲经济一直陷于困境的主要原因之一。公元前

430 前 427 年，雅典发生鼠疫，近 $1/2$ 人口死亡，整个雅典几乎被摧毁。第一次世界性鼠疫大流行；始于公元 6 世纪，源自中东，流行中心为近东地中海沿岸，持续近 60 年，高峰期每天死亡万人，死亡总数近 1 亿人。第二次世界性鼠疫大流行；史称“黑死病”，1348-1351 年在欧洲迅速蔓延，患者 3-5 天内即死，3 年内丧生人数达 6200 万，欧洲人口减少近 $1/4$ ，其中威尼斯减 70%，英国减 58%，法国减 $3/4$ 。此次“黑死病”延续到 17 世纪才消弭。第三次世界性鼠疫大流行；1894 年，香港地区爆发鼠疫，波及亚洲、欧洲、美洲、非洲和澳洲的 60 多个国家，死亡逾千万人。其中，印度最严重，20 年内死亡 102 万多人。流行性感冒简称流感，是由流感病毒引起的急性呼吸道传染病，能引起心肌炎、肺炎、支气管炎等多种并发症，极易发生流行，甚至达到世界范围的大流行。1918-1919 年，爆发了席卷全球的流感疫病，导致 2,000-5,000 万人死亡，是历史上最严重的流感疫症。自 2003 年来全世界已有 14 个国家 357 人感染了禽流感病毒，其中 219 人因感染了该病毒而死亡。目前的 H5N1 型病毒株仅能通过禽类传染给人体，必须防范它与人类的流行性感冒病毒株接触进行基因重组，突变出“人传人”的禽流感病毒。禽流感一旦在人际传播，数亿人生命将受到威胁。HIV 是艾滋病的病原体，主要通过体液、血液传播。艾滋病联合规划署和世界卫生组织在“2006 艾滋病流行最新情况”报告中说，世界上每隔 8 秒钟就有一人感染 HIV，全球每天有 1.1 万人感染 HIV，与此同时，每天有 8000 名感染者丧命。SARS (Severe Acute Respiratory Syndrome, 严重急性呼吸道综合症，俗称非典型肺炎) 是 21 世纪第一个在 23 个国家和地区范围内传播的传染病。2002 年 11 月 16 日中国广东佛山发现第一个非典型肺炎的病例。截至 2003 年 7 月 11 日，全球共 8096 名患者，死亡人数达 775，死亡率约为 9.56%。目前已经找到治疗方法，中国和欧盟科学家联手，成功找到了 15 种能有效杀灭非典病毒的化合物。香港大学的研究表明，蝙蝠可能是 SARS 病毒野生宿主。

流行病传播也跟随着一些地理空间上的思考。我们知道，流行病传播的过程，是通过人与人交互以及人在各种尺度上的移动实现的 [?]. 另一方面，疾病的控制也可以理解为缩减疾患出现的区域，使之不影响人们的正常生产生活。在历史上，我们也有一些成功的先例，利用地理信息系统的方式来对抗流行病的传播。我们举 1832 年英国霍乱的例子：英国医生约翰·斯诺 (John Snow, 1813-1858) 发现，伦敦霍乱的大量病例都是发生在缺乏卫生设施的穷人区，他利用伦敦死亡登记中心的死者住址数据，将霍乱疫情的起源定位到了布劳德大街上的一口公共水井。这个发现使得水井被废除，疫情

也得以消失。斯诺医生绘制的流行病地图是历史上影响最深远的可视化作品之一。这也是地理信息系统的思想的早期胜利。这说明用地理学的视角去理解疾病传播是有意义而自然的。

而随着城市化进程的不断推进，便捷的城市交通也加剧了流行病的蔓延的速度和控制的难度。出于对效率的追求，人类社会的诸多网络特征是无标度的。而根据网络上流行病学的基本结论：无标度网络上的流行病传播是不存在阈值的。即疾病最终会传染被网络连接的所有人 [?, ?]。流行病作为城市突发问题的典型代表，可以提示我们在城市区位设计的时候，不能完全遵循自组织的连接方式。其也应该有动态变化能力，以适应突发状况的出现。

数学模型可以作为真实世界很好的一个模仿。一个好的数学模型可以解释很多对真实世界的观测结果，给出洞见，并提升我们对系统本质的理解，对未来的决策也有指导意义。对于疾病传播来说，网络科学是一个比较合理的建模方式。我们也可以找到比较成熟的方式来对该类问题进行处理 [?]。已有的方法对于流行病的传播建立了一些有效的抽象模型。通过疾病传播过程中若干重要因素之间的联系建立微分方程加以讨论，研究传染病流行的规律并找出控制疾病流行的方法显然是一件十分有意义的工作。进一步，我们还将结合可达性与人类移动性的分析得出更多疾病控制的手段，为城市安全发展和城市韧性的提升提供合理的参考。

Chapter 2

研究现状与问题归纳

流行病学在数学上有着悠久的历史。现在的主流框架将问题归纳为两个层次：单点的疾病发展，以及疾病在网络框架下的传播。

2.1 流行病的传统数学模型

2.1.1 SEIR 模型的基本结论

传染病的基本数学模型就是 SEIR 模型。该模型假定人群分为 4 种，分别是：易感者 (SUSCEPTIBLES)，潜在的可感染人群 (EXPOSED)：潜伏者，已经被感染但是没有表现出来的人群；感染者 (INFECTIVES)，表现出感染症状的人；抵抗者 (RESISTANCES) 也即从疾病中恢复，并产生抗体的人，但是实际上如果是致死性疾病，死者也是算进这一项里的，毕竟死者妥善处理以后无法被感染也无法感染别人，和恢复者是一样的。通过对这几种人群数量的动态演化观测，我们可以确定疾病传播的不同阶段，进而制定防疫策略。下面我们分别说明模型包含不同成分时的基本情况。

最基本的模型是 SI 模型。该模型描述了人群中被感染过的人的数量的变化规律。根据已有结论，SI 模型中患病人数随时间的变化规律为 Logistic 曲线。该模型的经典结论是：所有人都会最终被感染；且疾病爆发时间出现在一半人口被感染的时候。用微分方程可以表示为

$$\begin{cases} \frac{dI(t)}{dt} = \rho IS \\ S(t) + I(t) = 1 \end{cases} \quad (2.1)$$

其解为

$$\begin{cases} I(t) = \frac{1}{1 + (\frac{1}{i_0} - 1)e^{-\rho t}} \\ t_m = \frac{1}{\rho} \ln \left(\frac{1}{i_0} - 1 \right) \end{cases} \quad (2.2)$$

该方法是不符合常识的：流行病通常不会使得所有人生病。实际情况中，有些被流行病感染的人会被治愈。病人恢复健康之后，可能会产生对该疾病的免疫力，也有可能反复被该疾病感染。这两种情况分别对应着 SIR 模型和 SIS 模型。

SIS 模型是在 SI 模型的基础上，增加新的假设：单位时间内病人可以治愈的速率为 α ，那么 $1/\alpha$ 就可以理解为感染期。传染病康复后没有免疫力，仍然是属于易感者类型的。于是我们可以定义传染指数：一个感染期内单个病人的有效感染人数，

$$\sigma = \rho/\alpha.$$

该模型服从的微分方程是 SI 模型增添了一项恢复的速率，即

$$\begin{cases} \frac{dI(t)}{dt} = \rho IS - \alpha I \\ S(t) + I(t) = 1 \end{cases} \quad (2.3)$$

这个模型是我们分析流行病传播的基准模型。该模型的基本结论是：患病人口长期状态下会趋于稳定，且是有效感染人数的函数。如果有效感染人数 $\sigma \leq 1$ ，则疾病最终会在人群中消失；反之，则患者群体会在人群中留有 $1 - \frac{1}{\sigma}$ 的比例。

SIR 模型同样历史悠久 [?]。该模型假设：除染病特征外，人群中的个体间没有差异；各类型个体在人群中混合是均匀的；总人数 N 不变，人数足够大，只考虑传染的平均效应；易感者染病的机会与他接触染病者的机会成正比；疾病的传染率是常数 ρ ，治愈率是常数 α 。可以用微分方程表达为

$$\begin{cases} \frac{dS}{dt} = -\rho IS \\ \frac{dI}{dt} = \rho IS - \alpha I \\ \frac{dR}{dt} = \alpha I \end{cases} \quad (2.4)$$

$$S(t) + I(t) + R(t) = 1$$

该模型的直观理解是：随着康复者 R 的不断出现，人群中感染者/可被感染者的数量在不断减少，直至消失。特别的，如果被感染者人数多于 $1/\sigma$ ，则疾病会出现一个高峰；反之患病人数则会单调下滑到 0。

2.1.2 网络上的流行病学

近二十年来，流行病作为人群中传播过程的重要实现方式，也在网络研究中被广泛讨论。人们关注的重点在于网络上流行病传播的阈值、收敛速度等问题。在网络上考虑流行病传播比较适合拓扑性质比较强的问题，比如疾病在大空间尺度上通过航空网络进行传播；在城市内通过铁路网络进行传播等。

目前也有一些工作将注意力转移到了空间网络上。这样的处理，更适合强调地理临近性的空间关系。

2.1.3 人类移动性模式

2.2 社会接触模型

2.3 问题归纳

结合地理大数据和空间交互模式研究可以对流行病传播的规律与控制流行病传播产生促进作用。这些规律亦有助于我们探讨城市在面临突发状况时，什么样的应对方式才是比较合理的。现有工作在归纳疾病传播一般机理上框架趋于完备。

Chapter 3

研究内容

根据对流行病在人群中传播建立的微分方程，我们将研究如下几点内容：

- 描述（尤其是有潜伏期的）传染病在人群中、网络中、广义地理空间的传播过程。
- 预报传染病高潮在复杂地理空间中到来的时刻。
- 对于存在疫情的城市建立安全区域与安全交通网络。

即 SIS 模型中，在给定人群数量是 N ，且人口充分混合的情况下，被感染人口只会稳定在一个固定的比例 I_e 左右；而一旦被感染者消失， $I = 0$ ，人群中就永远不会再出现感染者了。这是隔离的数学依据：总人口为 N 的群体，在某一个瞬间有 I 个感染者，且我知道 ta 们是谁（如果不全知道，可以暂且将疑似患者当作病人）；那么我将完全健康的人分为一组 S_1 ，不确定是不是健康的人分为一组 I_1 ，两组人不可以见面（将 I_1 组隔离）。过一段时间之后， S_1 依然是完全健康的， I_1 作为一个新的群体，健康的人会稳定在 γ/β 倍的 I_1 左右。同样的，我将这些完全健康的人分为 S_2 组，另外的不确定健康的人分为 I_2 组，进行隔离。我可以保证健康为 $S_1 + S_2$ 。依此类推，最终达到没有活体感染者的时候，疾病就消失了。

隔离代表着充分混合的反面，即交互为 0。隔离可以不让传染病传染两侧的人。隔离的在数学上的本质意义在于划分出一个确定的，总数为定值（记为 N ）的人群。无论什么样的 ** 充分混合 ** 人群，初始状态的得病人

数是多少, 稳定状态都是一个只跟该疾病的 ** 传染速率 ** 和 ** 恢复速率 ** 有关系的固定比例。下文里面我们记这个比例为 $(1 - \gamma/\beta) = p\%$ 。隔离掉得病比例高于该比例 $p\%$ 的人群有助于疾病的防控; 而其他的情况, 固定人群数量的时候, 患病人数几乎都会达到稳定状态 $p\%$ 。所以大规模隔离往往是无效的, 因为我们能见到的流行病, 发病率往往远远小于 $p\%$, 这般隔离, 如果没有救治, 会使得患病人口最终达到 $p\%$ 。好的解决办法只有是分离出高于该比例的小区域, 这样才是有意义的隔离。这也是细致地图的重要用途。需要 GISers 的努力。连通的无疾病区域, 无论多大都是安全的; 分离高比例患病人群的区域, 有助于患病比例自然降低, 也方便集中救治。这应该是我们政策的导向: 使得更大确定没有病的人, 在更广阔的空间上自在的生产生活。

异质性人口建模目前主要集中在复杂网络上的流行病传播方面。研究目标大多是稳定人口与网络结构的关系。这种问题的探讨沟通了“完全没有沟通的隔离状态”和“充分混合的普通状态”, 是一种中间状态。这种建模方式通过网络连边来限制可能接触到的人。

网络上疾病的传播也是一个经典的建模例子: 假设每个地物是网络的一个结点, 每个地物附近有着一些人口。结点之间存在着交互, 也伴随着疾病的传播。无标度网络极易传播流行病, 甚至没有临界人口。人群按照无标度连接很有可能全员感染。我们可以由此推断, 城市建设走最高效率的无标度建设方式是行不通的。空间上这个问题还非常有待解决。重新建模是必须的。对于流行病学来说, 临界人口的确定是很重要的事情。也是我们了解一个疾病需要做的第一件事。本质上来说, 这个阈值是一个“密度”, 或者是“强度”。只有确认了充分混合的人口总数, 我们才可以确定这个数字 p 。所以可能可以做的事情, 是直接用局部异质性人口密度 ρ_S 、 ρ_I 、 ρ_R 来取代原有的纯量关系。进而用移动性模式来确认传播规律, 更进一步, 可以通过限制/指示各个人群的交互强度来分化高患病密度人口。

3.1 研究框架

3.2 研究内容

3.2.1 流动配置问题

静态资源配置问题已经被广泛研究。我们在这里面向问题的另一个方向，即有目标的流配置问题。该问题受到基础设施的空间分布、人口固有密度、移动性加权等问题的影响，体现出极度复杂的特性。而在对于疫情防控来说，隔离程度又是一个必然要解决的重大问题。我们有必要将其抽象成流动配置问题来进行统一处理。

3.3 预期创新点

全他妈是创新点。

Chapter 4

论文组织结构及时间安排

4.1 论文组织结构

第一章为**绪论**。主要介绍文章的研究背景、研究意义，梳理网络上流行病学研究现状，探索其在空间上扩展的潜力。并描述论文研究框架。

第二章为空间疾病传播模型的临界现象。

第三章为空间抗打击规划及应急疏散方案。

第四章为交互时间修正的重力模型对疾病传播的动态影响分析。

第五章为结论及展望。

4.2 时间安排

2020 年 7 月，完成论文的绪论部分，并完成空间疾病传播临界现象的小论文撰写。

2020 年 8 月，整理、敲定论文第二章；

2020 年 11 月，完成论文第三章撰写；

2021 年 6 月，完成论文第四、五章撰写；

2021 年 12 月至 2020 年 2 月，完成博士论文初稿；

2021 年年 3 月，结合导师意见完善博士论文；

20 年年 4 月，完成博士论文，开展博士论文答辩工作；月，完成博士论文，开展博士论文答辩工作；2020 年年 5 月至月至 2020 年年 6 月，参

照评审意见对博士论文进行修改，并完成学月，参照评审意见对博士论文进行修改，并完成学位论文提交。位论文提交。