

目前,全球新冠肺炎疫情发展迅速,海外累计确诊病例超过30万人,但中国新冠肺炎疫情防控形势持续向好,国内连续多日无新增病例,生产生活秩序加快恢复的态势不断巩固和拓展。国家卫健委发布的数据显示,截至3月23日,疫情重灾区湖北省也连续6天新增确诊病例为零。国际社会认为这显示了中国抗疫行动果断高效,给其他国家战胜疫情带来信心和希望。那么,中国的新冠疫情防控策略为什么科学有效?有没有数学模型认识中国的新冠疫情防控策略?本期邀请数学教授、北京邮电大学校长乔建永详细解读——



日前,援鄂的医护人员胜利返程。

新华社发

科技史

应对新冠肺炎疫情,我国采取了许多有效措施,包括减少人口迁移、鼓励戴口罩等,切断了传染源,最大程度地限制了病毒的扩散,从而取得了科学防疫的重大胜利。

今天发生在中国的疫情,历史上曾在多个地区上演过。在人类漫长的历史中,瘟疫一直是个国家都不得不面对的严重威胁之一。而切断传染源,对于控制瘟疫等传染病非常重要,曾发生过拆下一个水泵把手便可阻止一场大瘟疫的例子。比如,在维多利亚时代的英格兰中心——伦敦。

这是一个夏末午后,伦敦依旧沐浴在暑气未消的炽热夕阳与“腐败”的空气中,约翰·斯诺的诊所接诊了一名腹痛、喷射性呕吐、米泔样便的患者,一整个下午的抢救才让这名患者从死神手里捡回一条小命,但是持续的高热和脱水最终还是让他选择了性命。最要命的是,患者的邻居们,也在之后的几天里逐渐被送了回来。

霍乱不是第一次到伦敦了,维多利亚时代的辉煌之下,却是瘟疫几番肆虐的墟境。1831年第一次霍乱疫情,死亡人数6536人,1848年霍乱再度来袭,死亡人数14137人,而1854年,霍乱第三次袭击了伦敦,短短一周时间,斯诺居住的苏活(Soho)区的死亡人数已经超过了常住人口的1/10。

不断接诊霍乱患者的斯诺换上了更加严密的口罩,开始给整个诊所消毒。霍乱究竟如何传播当时尚无定论,不过当时伦敦医生们大多笃信“瘴气说”,认为霍乱在伦敦的由土壤散发的“腐烂”瘴气是霍乱的罪魁祸首。

这么说的原因很好理解。维多利亚时代的工业帝国辉煌下,是伦敦如同粪坑一般的城市现状,人口的爆炸增长与冲水马桶的应用带来了城市的繁荣与生活的便捷,却没有与之相适应的排水系统。霍乱弧菌是难以被看见的,但伦敦街头四处都可以闻到有机物分解后硫化氢混着臭味类物质的刺鼻“芬芳”确实是事实。

然而,斯诺医生却对“瘴气说”充满了怀疑:如果有有害气体导致了霍乱,那么为什么发病的症状是肠道问题而不是呼吸道问题?既然每个人都要呼吸有害的空气,为什么贫民窟的居民发病率远远高于庄园里的贵族的?细心的斯诺医生将病人的住处记录了下来。

通过将区域内578名死亡病例绘制在地图上,斯诺发现,大部分死亡病例出现在宽街(Broad Street)和剑桥街(Cambridge Street)交叉口水泵附近,他意识到,或许水源才是霍乱真正的传播媒介。

约翰·斯诺在写给《医疗时报和公报》的信中写道:“在进行点示图分析中,我发现几乎全部的死亡案例均在宽街水泵的短半径内。只有十个案例是围绕另一个街的水泵。在其中五个死亡病例中,其家属告诉我,他们经常到宽街的水泵取水,而不是更近的水泵。在其他三个案例中,三个孩子均去宽街附近的学校读书。至于从地理位置上属于该水泵的居民死亡案例中,有61名曾经饮用过宽街的水泵水,无论是经常还是偶然……”

在之后的研究当中,助理牧师亨利·怀特海德加入了约翰·斯诺的团队之中,他很早便致力于推翻瘴气理论,而斯诺的宽街霍乱患者地图也促使他坚信霍乱是通过被污染的水源进行传播的。

两人使用人口统计学研究的科学观察方法也成为了之后兴起的流行病学的发端。在确定了宽街水泵是霍乱的源头之后,约翰·斯诺向圣詹姆斯教区监护委员会报告了自己的发现,委员会采纳了他的建议,第二天,宽街水泵的把手被卸下。此后的几天,不得不使用其他水泵的宽街居民中没有新发病例出现,霍乱在Soho区的爆发得到了控制,这导致斯诺第三次起了自己的镰刀。

水源被破坏后,霍乱的传播途径被有效切断,疫情得到了遏制。斯诺的“死亡地图”发表后,人们也不再从神学和道德的角度去解释疾病,而是通过科学的方法去研究和控制。斯诺的方法也为现场流行病学创立和发展奠定了基础,而流行病学作为一门学科在此后的疾病暴发的溯源与防控中起到了重要的作用。

在现代医学的努力下,霍乱、天花等带来过无数灾难的传染病也逐渐淡出了现代人的视野,然而诸多新发传染病却依旧在世界各处肆虐,2003年的SARS,后来的H1N1,非洲的埃博拉,中东的MERS,还有2020年初这场在全国范围掀起轩然大波的SARS-CoV-2。每一次疫情的有效控制,都离不开临床医学、公共卫生与基础医学多学科共同努力;每一次疾病的爆发,也都会以极大的代价促进生命科学发展和卫生体系的进步,期待这次新冠肺炎疫情能尽快结束,中国和世界的疾病控制体系得到进一步完善,也希望每个人都能形成更加科学的观念,与自然和谐共处。

切断传染源有多重要

方 圆 刘 孜 铭

数学方法分析中国抗疫模式的有效性

乔建永

当前,中国本土连续多日无新增病例,疫情重灾区湖北省新增确诊病例也为零,我国疫情防控取得了扭转战局的重大进展。伴随着春天的脚步,中国战胜新冠病毒肺炎疫情的形式持续向好。最近,国内外互联网上不断有人发问:中国的抗疫模式是否可以

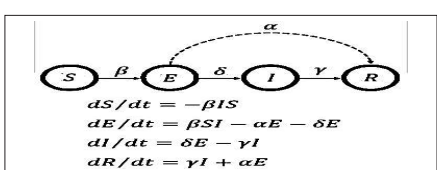
在其他国家复制?笔者从传染病的数学模型入手,通过分析我国抗疫策略的内在数学逻辑,阐述中国抗疫模式的科学性。历史上,正是依靠数学对于传染病的模型化研究,人类才对其传播模式和严重危害有了更为深刻的理性认识。

1 从数学模型认识封闭管理与疫苗的重要性

数学模型,是用数学公式、运算程序,结构图形等对实际问题本质的抽象和刻画,是对真实世界的一种模拟。它能够解释客观世界的很多现象,预测事物的发展演化规律,为控制某一现象的发生和发展提供一定意义下的优化策略。数学模型其实并不是现实问题的直接拷贝,它的建立既需要我们对现实问题的深入观察、推理和分析,又需要我们灵活巧妙地利用各种既有的经验和科学知识。这种应用知识从实际问题中抽象、提炼出数学模型的过程被称为数学建模。

有多少人感染?因痊愈或死亡产生的移除者又会有多少?为了求出不同人群与时间的关系式,数学家引入了一组微分方程。它虽然看起来很简单,但我们面临的任务却彻底理清清楚了,就是要解出这个方程里的S、I、R与时间t的关系函数。今天我们用计算机把这些关系函数画出来,就是通常我们在媒体上看到的疫情预测曲线。

SIR模型非常简洁,计算出来的传染趋势也在历史上得到过有效印证。然而SIR模型的缺陷也是非常明显的,比如,本次新冠病毒肺炎存在14天的潜伏期,感染者可能在14天内完全没有任何异常症状,因此简单的三类人群划分在这里显然是不够的。考虑这一因素,可以把SIR模型进一步发展为SEIR模型,能够更精确地刻画新冠病毒肺炎疫情的传播趋势。这需要在SIR模型中加入潜伏期人群,用E表示,它是SIR模型的推广。如果用 $\beta, \delta, \gamma, \alpha$ 依次表示S转化为E, E转化为I, I转化为R, E转化为R的比率,则其微分方程如下:



这个听起来高深莫测的数学模型,原理其实并不复杂。比如,在一个固定的社区里,假设每个人接触病人时被传染的概率为P,并假设每个病人平均每天接触到N个人。在这个假设下,不难发现,得病的人数会随时间以指数函数形式增长。如果N与P的乘积小于1(即 $NP < 1$),传染病会逐渐减少,如果 $NP > 1$ 则会爆炸式增长。这样看来,控制疫情的途径无疑是要把N和P的数值降下来。现在,我们闭门锁户,封城,限制流动和聚会,就是为了降低N的数值;紧急研发疫苗、戴口罩、勤洗手消毒,常锻炼、注意营养均衡、提高免疫力,则是为了把P的数值降下来。这就是最简单的传染病数学建模。

用数学模型研究传染病的历史,最早可以追溯到十八世纪初。当时天花病毒肆虐欧洲,人们发现东方传人的痘接种术似乎能够治愈这种传染病,但接种后仍有很高的死亡率,这引起了数学家伯努利的注意,他开始思考用数学方法来描述天花的传播以及接种的效果。伯努利将人群分成感染者与未感染者,感染者既有可能治愈变成未感染者,也会因病死亡,以此建立了数学方程。伯努利的想法虽然很直观,但经过计算,他竟然得出了人痘接种在统计意义上仍然能让人寿命延长3年左右的结论。今天看来,伯努利的研究很显然是初步的,但这种科学思维在那个人类命运完全被传染病支配的时代显得尤为珍贵,直到今天仍然是用数学方法研究传染病的基本思想。

进入二十世纪,用数学模型研究传染病的方法获得了飞速发展,这很大程度上要归功于SIR模型。这个模型用S代表易感者,也就是可能被传染但还没有感染者;用I代表感染者,即已经被传染但尚未死亡的人;用R代表移除者,他们被感染后痊愈或者因病死亡。SIR模型还有一个样本人数不变的假设,即易感者、感染者和移除者的人数之和保持不变。有了这样一个数学模型,我们需要研究三个群体随时间的变化趋势,第一天有了N个感染者,到了第T天会

2 系统动力学提示科学防疫要做好三件事

全国范围的疫情防控之战自然比一个社区、一座城市的防疫战更为艰苦卓绝,其中的主要原因是城市之间有立体的交通、交往、信息等人类活动的社交网络,这些网络构成病毒传播的层级体系,病毒可以乘高铁、飞机、轮船实现网上快速传播。整个网络组成一个层级化的复杂系统,病毒在其上传播过程异常复杂,除了传播速度难以驾驭,还有传播过程会间或演化出混沌现象,展示出现代科技手段无法应对的莫名其妙的特征。

我们只要用疫情的科学指标给这一网络的每个节点以及连接这些节点的关系赋值,就可以生成一个网络动力系统。

系统动力学提示科学防疫要做好三件事:一是把城市封闭成节点。每个城市自封闭管理,只能作为一个整体同相邻节点连接,形成城市群网络。这是全国总体战的必然战略选择;二是积极推动恐慌情绪向正能量转化。信息和病毒传播

的耦合很有必要,不要怕披露信息引起恐慌,但要避免多种恐慌情绪叠加造成的混沌效应。恐慌情绪一旦转化为正能量,就会跟踪和阻断病毒传播;三是让病毒在博弈中退化。一旦城市群网络演化为博弈网络,就会逐步训练出阻断病毒进化的功能。

说到这里,自然有一个问题:博弈网络中的博弈主体是谁?仔细一想,还真是一个值得思考的问题,展示出现代科技手段无法应对的莫名其妙的特征。

大家知道,博弈论可以定义为:把动物利用大自然移动的灵感,在决策人期待的空间里形成三维均衡的学术理论。博弈论的基本前提有:决策主体是理性追求自己利益的最大化;完全理性是共同知识。局中人、策略和收益是这一理论的三大基本要素。简而言之,它是人们在平等的对局中,各自利用对方的策略变换自己的对抗策略,达到取胜目的的理论。



全国抗疫取得阶段性胜利。

新华社发

3 引导和催生典型行为人的合作博弈是疫情防控的制胜法宝

既然人类不能同病毒博弈,那么,这场博弈的主体或局中人是谁?如前所述,他们一定是多个智慧主体,病毒及其传播方式只是这场博弈的策略工具。仔细分析疫情防控阻击战的动力学机制,不难发现,第一个典型行为人可以定义为病毒传播的智能主体,一些人有意或无意之中担当了病毒传播的角色,可以把这一主体理解为大量这方面行为的智能集合体;第二个典型行为人是人类,人类和病毒应当寻求的是一种和平共处、相辅相成的状态。有一个著名的科学实验说明,没有病毒的海水中,浮游生物停止了生长。也就是说,病毒在感染侵略性的微生物时,会释放出营养物质,而这些物质恰巧是其他细菌赖以生存的必需品。病毒和被病毒感染的生物体是全球生态系统中不可缺少的重要组成部分。

其实人类能够走到今天,病毒功不可没。有研究认为,曾有一种古老病毒将遗传物质插入人类祖先的基因中,这段“被迫改编”的遗传物质是人类现代神经系统的一部分,如果没有它们,人类的智慧或许没有今天

这么成功。因此,在这场博弈中,我们的目的绝对不是消灭病毒,而是去科学地认识、控制和适应它。事实上,从古代欧洲的黑死病到西班牙大流感,到2003年的“非典”,再到这次新型冠状病毒爆发,人类在几百年间对瘟疫的应对方式其实并没有多少本质上的改变,治疗、隔离、消毒、抚慰和逃离,大体如此。隐含其中的道理是,人类不可能消灭病毒。

毋庸讳言,我们的免疫力正伴随着病毒的威胁在不断发展;同样,免疫力也正在推动病毒不断进化。这场席卷全球的疫情提醒我们,要重新审视生命和病毒之间相辅相成的关系,既要积累与之共存的智慧,也要拥有和平共处的策略。这样,引导和催生典型行为人的合作博弈意识就成为疫情防控的制胜法宝。写到这里,我仿佛听到数学模型和博弈论铿锵有力的请战誓言:给我们一把大数据吧,病毒将被封闭在严密的数学逻辑的链条之下!

(作者系北京邮电大学校长,数学教授、系统动力学专家)