

从传染病到健康生活方式的传播模式

02 年末的时候，我在北京听说广东一带正在流行一种奇怪的“咳嗽”，而且那一带的人正在疯买板蓝根和醋来预防等，当时只是当作了笑谈而已。可仅仅过了几个月的时间，那种奇怪的“咳嗽”就已经蔓延到了全国的几乎所有角落，包括党中央所在的北京。于是，这个“咳嗽”终于摆脱了地下身份，开始正式以学名为 sars 的传染病迅猛传播。

为什么这种传染病可以这么快的蔓延到全国？这正是复杂网络这样一个新兴的学科试图回答的问题。在 1998 年的 *自然* 杂志上，一篇来自康奈尔大学 Watts 博士和他的导师 Strogatz 教授的文章给回答这个问题提供了线索。在这篇文章中，他们猜测人类的关系网是位于规则网络和随机网络之间的一种网络结构。什么是规则网络呢？如下图所示，“我”的几个邻居间距离很近（这儿把有直接联系的两人互称为邻居），甚至有可能互为邻居。什么又是随机网络呢？“我”的邻居是在整个网络的节点中随机找到的，因而他们分布在整个网络中，很可能互相不认识。

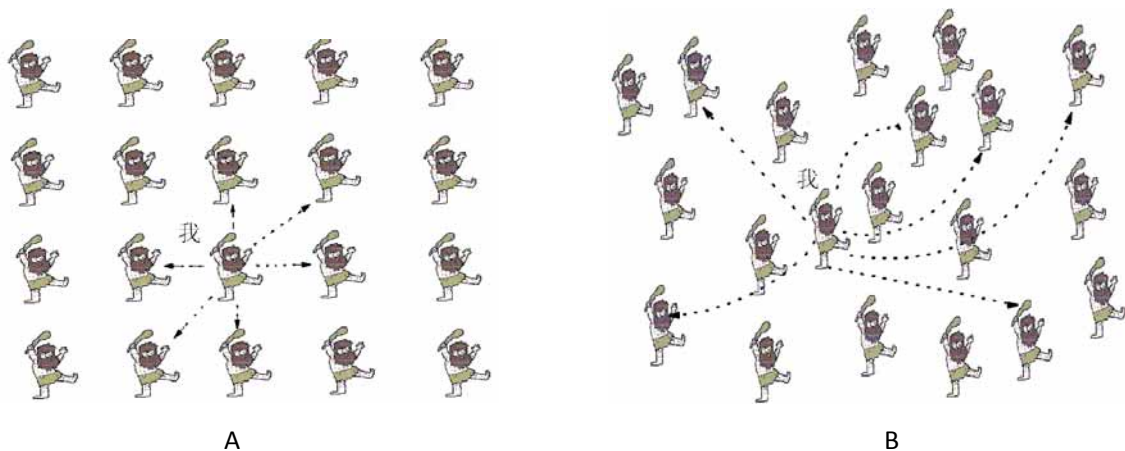


图 1：规则网络和随机网络的示意图。虚线只画出了“我”作为中心的邻居关系，图中每个人的邻居关系都和“我”是一样的。A) 空间距离可以表示拓扑距离。“我”的邻居间距离小，可能互为邻居。B) 空间距离没有实在意义。“我”的邻居是在整个网络中随机选择的，因而分布在整个网络中，可能互相不认识。

在复杂网络的研究中，用节点表示研究的的人、电站、甚至细胞中的蛋白质分子，而节点间的连线表示两者间有直接的联系或相互作用。同时，有两个刻画网络性质的重要参量：集聚

系数和节点间平均距离。在规则网络中，一个节点的邻居间可能互相熟识，有直接连接，会形成小集团。集聚系数衡量的是网络中各个小集团中的个体间的熟悉程度的平均值。如果小集团中的每个人都认识其他所有的人，这个小集团的集聚系数可以达到最大值 1。因为规则网络的小集团中的邻居间可能互相熟识，所以集聚系数很高。“鸡犬之声相闻，老死不相往来”的传统中国乡土社会中，一个人常常一辈子生活在小村子的乡亲中，其热衷的事可能就是在酒馆中讨论邻居的家长里短。这种社会形态构成的关系网络的集聚系数当然很高。而在随机网络中，“我”的邻居之间可能互相不认识，从而导致了集聚系数很低。

衡量网络的另一个重要参量是网络中节点间的平均距离。我们把某对节点间的距离，定义为网络中的这两个点最少需要另外几个节点才能联系起来。上述的规则网络中，一个节点只与自己的几个邻居直接联系。如果一个节点在网络上方，一个节点在下方，那么连接两点的最短路径要遍历“从上到下”那条路径上所有节点。而在随机网络，两个随机选中的节点，幸运的话，有可能会直接联系上。即使一般情形下，两点间会存在着大量的“捷径”，而不用像规则网络中一样要遍历“从上到下”的所有节点。由此可见，规则网络的集聚系数高，节点间平均距离长；相反，随机网络的集聚系数低，而节点间平均距离短。

Watts 博士发现，表征人类社会的关系网络可以用如下办法产生：从一个规则网络出发，以一个固定的较小的概率（百分之几）在网络中所有的连线中选择，被选中的连线要改变其连接，被连到随机选取的一个节点。就是这个小小的改变，它产生了意想不到的后果。首先，网络中因为仅仅只是改变了很少的连线，所以集聚系数改变很小，还是一个规则网络的高集聚系数。但是，节点间平均距离大大缩短了。其原因是，这些被随机改变的连接可以起到大量节点间连接的“捷径”的作用。他把这种网络形象的称为“小世界”网络。

据说，Watts 博士当时研究这个题目是因为他对这样一个现象感兴趣：美国人常说的，“我和总统之间只有六次握手的距离”，即可以通过六个人和总统联系上。于是，他欲罢不能，选择这个题目做博士论文。而这个选择居然得到了他的导师 Strogatz 的支持（如果是我，肯定会直接告诉这个意想天开的博士生，不折腾）。他们根据实验数据，在那篇 *Nature* 文章中表明，人类社会中的电影演员关系网络、电网、以及一种线虫的神经分子关系网都具有集聚系数高，节点间平均距离短的特点，而这些正是“小世界”网络的独特性质。

在现代社会中，总有少数一些不甘于只在几个邻居间生活的“高能量”个体，他们会飞到外面的精彩世界，从而“去寻求别样的人们”。通过这些人，可以使得社会中任何两人间的“握手距离”会极大缩短，而使人有“世界真小啊！”之感。我曾经计算过我与美国总统的距离，当时很后悔听杨振宁教授报告时没有去和他握手。否则，我和美国总统的距离会大大缩短。

假设当你和 sars 患者一次接触(甚至不需要握手),就会被传染。而人类社会结构类似于“小世界”网络的结构，因为人与人间的平均距离因为少数的“高能量”个体而变短，所以传染病的传播速率也会以相同的规律增大,从而导致了传染病在整个社会中的快速传播。当然，这也告诉我们，发现并且限制这几个高能量个体可以极大的阻碍病菌的流行速度。

自从“小世界”网络的概念出现后，人们普遍认为，网络中的随机连接会导致节点间平均距离变小，从而加快病菌、谣言的传播。而规则网络所具有的高集聚系数往往对传播不利，局域上有“冗余”的连接。那么，这种规律是否也能扩展到一些较为复杂体系的传播，如健康生活方式、宗教信仰，甚至科学、文化呢？

最近的科学杂志上发表了美国麻省理工学院的 Centola 博士的一篇实验论文，研究了健康生活方式在随机网络和规则网络中如何传播。在这个实验中，他构建了两个计算机虚拟社区，并把这两个虚拟社区分别建造在随机网络和规则网络上。在这两种网络中，规定和任一台计算机直接相连接的计算机数量是固定的。构建好这样两个计算机虚拟社区后，Centola 博士找到一批自愿者，然后把这批自愿者随机的分配到这两个社区中。每位自愿者在自己的计算机上只能看见自己邻居的活动状况，而看不见其他人的状况。而且任何两台计算机之间，包括邻居间，不能直接通信联系。这批自愿者会被告知有一个关于健康生活方式的论坛，这个论坛讨论的话题有如何减肥与节食、有氧锻炼对人的益处或者如何减压和放松等。如果你在这个健康论坛注册了，你的每位邻居都会收到论坛的邀请信，请他（她）去注册。假设你有邻居 A、B，而你的邻居 A 又是你邻居 B 的直接邻居。如果 A 注册了，你和 B 会一一收到去论坛注册的邀请信。如果 B 禁不住劝诱也注册了，你又会再次收到论坛的邀请信。

这个实验开始是 Centola 博士在这两个网络中，分别指定一个人到健康论坛注册，他的这个行为会影响到他的邻居，从而在这两个网络中开始了一轮动力学演变。他的这个实验每一轮

会运行 3 天，共运行了 6 轮。得到的一个很显著的结果是，在规则网络中，因受到邻居影响去注册的人的增长速度要快于随机网络。而且规则网络中有更多的人受到影响，平均有 54% 的人 would 去论坛注册，而在随机结构的网络中只有 38%。

那么分析一下为什么在规则网络中，人们更加倾向于接受去注册的行为？从个人的观点看，在这两个网络中的环境是一样的。都有相同数量的邻居，不能直接通信，但会接受到邻居注册时论坛的邀请信。所以，这个实验结果的差异只能归因于网络整体结构的差异。在规则网络中，聚集系数高，如果在一个完全熟识的小集团内，“我”会影响了到我所有的邻居，而这些邻居每一个又会重复影响到“我”以及其他的邻居。这样，导致了一些观点较顽固的邻居顶不住好几个邻居的压力，终于妥协了。而在随机网络中，因为“我”的邻居间很可能互相不认识，所以不能重复的互相的影响，导致某些观点较顽固的家伙能够继续固执己见。

这篇文章表明，对于这种比较复杂的传播对象，如实验中的健康生活方式，再远一些如科学、文化，远不像病菌那样接触一次即传播开了，它需要有一个小环境在那儿，需要周围有一批人能够不停的提醒你、规劝你、刺激你，这样这个复杂的体系才会慢慢渗透到网络中新的角落。想一想现代科学进入到中国的百年历史，经过了多少的碰撞、反复啊！

从“小世界”网络中的病菌传播，到规则网络中健康生活方式的传播，是复杂网络这一个新的学科从萌芽阶段到重要进展的两个片断。现在，来自不同领域的研究者，物理学家、数学家、以及生物学家等正在一起联手推动这个学科的进展。

胡锋 2013-10-12

参加评奖（第三届“PSI - 新语丝”网络科普奖）

作者：胡锋 地址：重庆市大学城重庆师范大学物理与电子工程学院 邮编：401331