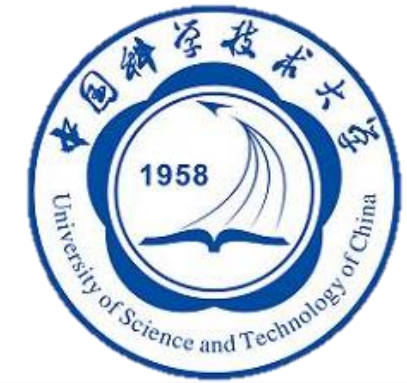




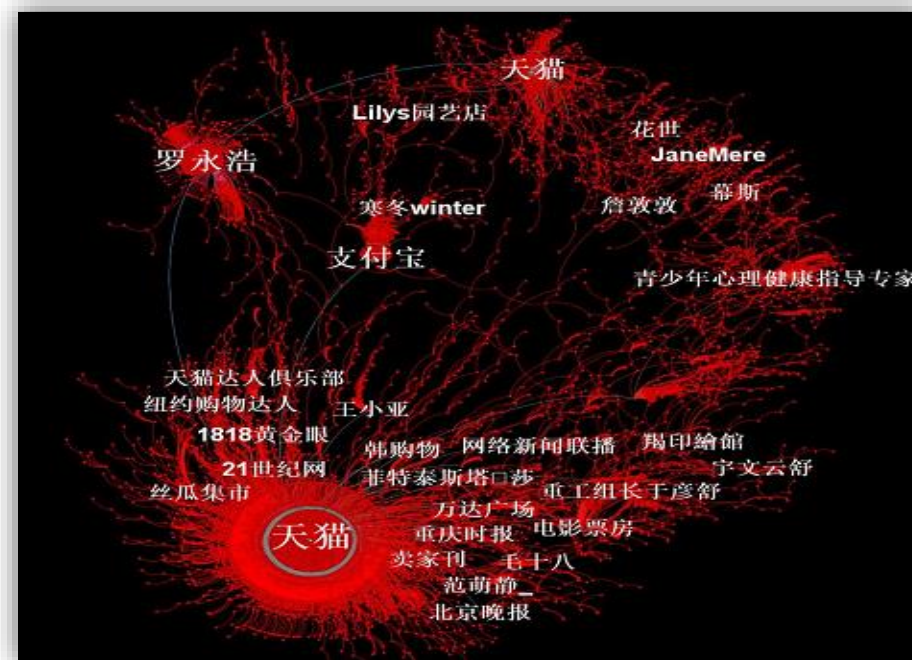
# 社会计算

## 第五节 信息级联

徐童      2025.3.31

## • 节点地位/权力评估的目的

- 无论是节点权力的评估，还是地位的衡量，其目的都在于寻找“话事人”
  - 大V节点的发现，是有效理解和利用社交信息传播过程的基础
    - 事实证明，人是可能被社会化影响的！
    - 影响力用户对于影响传播有正面促进作用



- **链接预测：属性的影响**

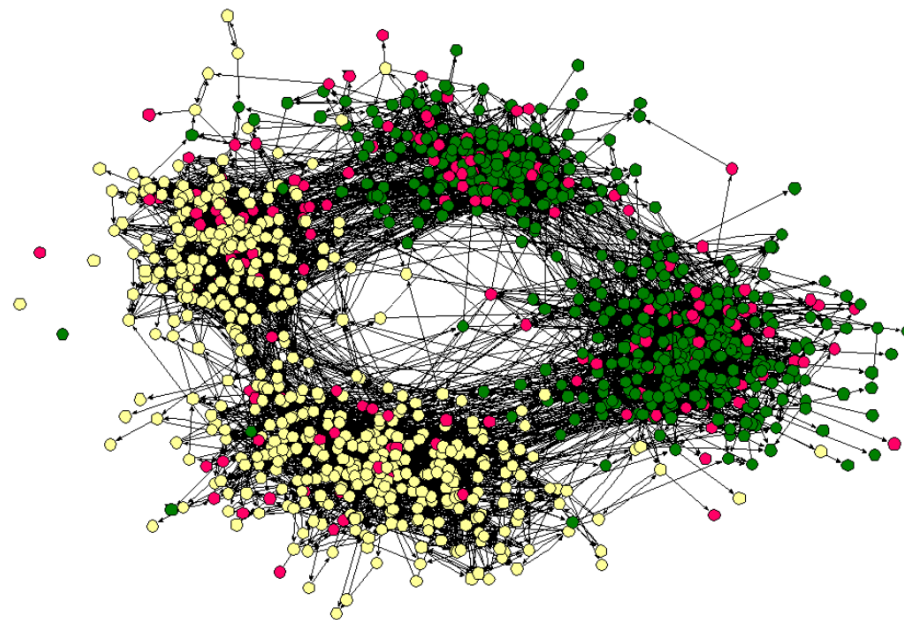
- 而当这种影响达到一定程度的时候，可能会出现一些明显的**分化**现象

- 同质性的影响：人们在选择好友时，往往倾向于选择同类属性的节点

- 例如，右图为某个镇中学的学生社会网络

- 其中，从左到右的颜色分别代表不同的种族

- 显然，图中呈现出明显的种族分化



- **从同质性到社会影响/传播**

- 同质性并不限于静态的相似/相关，还会产生动态、长期的影响
  - 同质性究竟如何影响人们的行为、属性？
  - 人们的跟风行为究竟如何形成，又有何种数学动因？
  - 常见的传播模型有哪些？
  - 传染病模型包含哪些变种，其区别在哪？



- 网络节点同质性

- 节点归属与节点隔离现象

- 信息级联

- 节点的“随大流现象”及其数学成因
  - “沉默的螺旋”

- 基本传播模型

- 传播的博弈视角

- 传染病模型

- 从同质现象的表面说起
- 小时候听过的小故事之一：孟母三迁
  - “孟子生有淑质，幼被慈母三迁之教。”



- 从同质现象的表面说起

- 人的属性不是一成不变的，而是呈现出鲜明的“社会化”特点
  - 随着人的成长，其行为、兴趣等也在逐渐与周围环境趋于一致
    - 这一过程往往被称作“社会化”（Socialization）或“社会影响”（Social Influence）
      - 典型的例子：口音的变化
  - 由此可见，同质性的作用可以投影在一个较长的时间轴上



- 从同质现象的表面说起

- 人的属性不是一成不变的，而是呈现出鲜明的“社会化”特点

- 同质性的影响案例（1）恶性事件的传播

- 新闻报道对于恶性案件的细节描述，是否应该控制？

- 面向加拿大2.2万12-17岁青少年的调查显示

- 12-13岁的少年在得悉自杀事件后，本人发生同类想法或行动的风险增加了4倍多

- 14-15岁对应的数据为3倍多，而16岁以上则降为2倍多

- 类似调研显示，有一位自杀的好友，自杀风险增加1.5倍

- 其他负面事件，如谋杀、离婚等也体现类似倾向



- 从同质现象的表面说起

- 人的属性不是一成不变的，而是呈现出鲜明的“社会化”特点

- 同质性的影响案例（2）肥胖的“传播”现象

- 相关调查显示，与肥胖相关的行为呈现一定的传播性

- 有一位直接好友肥胖，本人肥胖的概率增大45%

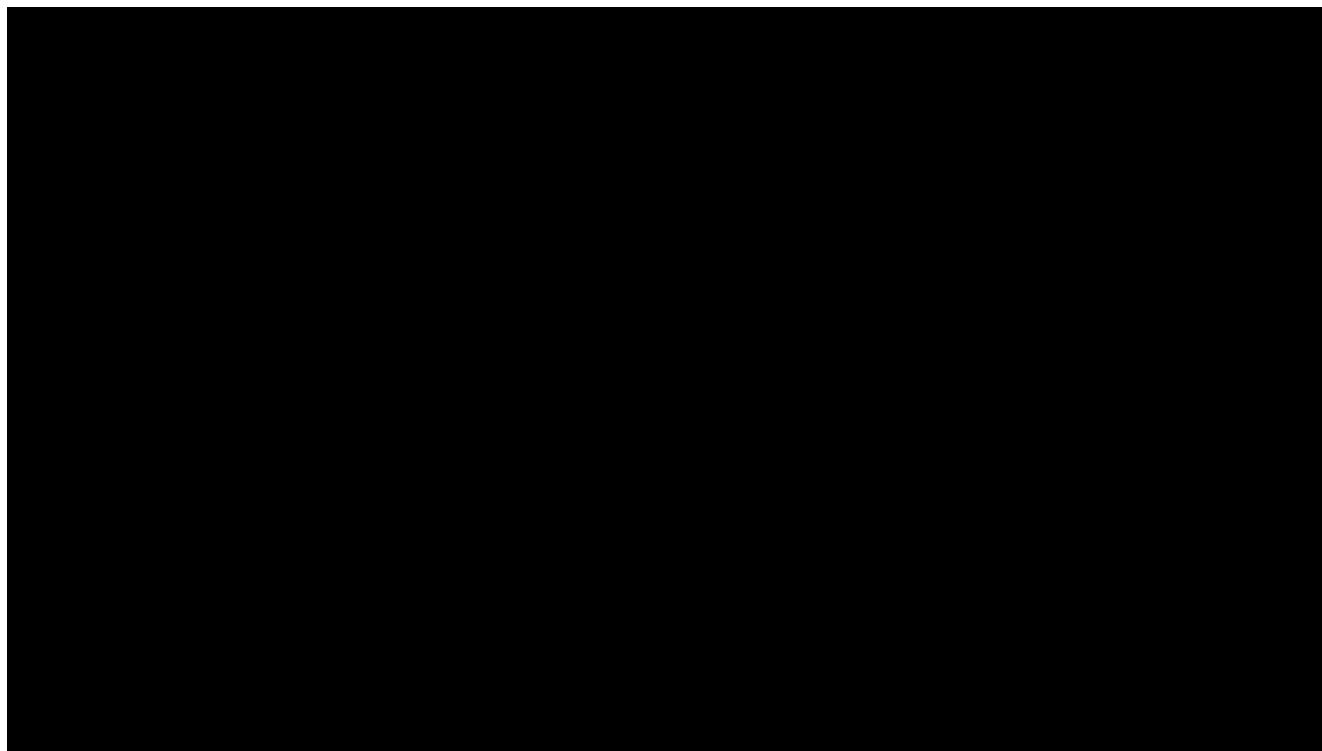
- 间接好友（二阶）将导致肥胖的概率增大20%

- 三阶好友将导致肥胖的概率增大10%

- 四阶好友的影响可以忽略不计



- 从同质现象的表面说起
- 人的属性不是一成不变的，而是呈现出鲜明的“社会化”特点
  - 同质性的影响案例（3）  
瞬时行为的传播



- 同质现象背后的机制是什么？

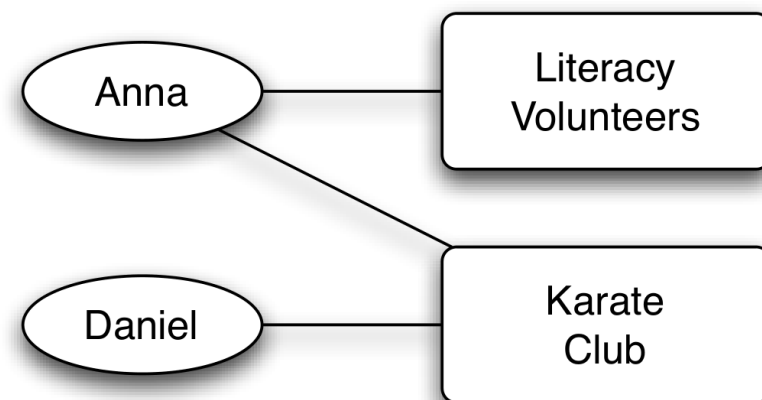
- 人的属性不是一成不变的，而是呈现出鲜明的“社会化”特点
  - 上述的例子总结为一点：节点的关联与节点的属性呈现明显的正相关
  - 问题来了：这种正相关，来自于选择，还是来自于影响？
    - 选择：人们有意识地选择和自己相似的人建立关系
    - 影响：人们被施加影响，从而改变自己的属性/行为
  - 换言之，同质性究竟是原因，还是结果？



- 节点的归属与成因

- 我们先从最基本的一类网络：节点的归属网络谈起

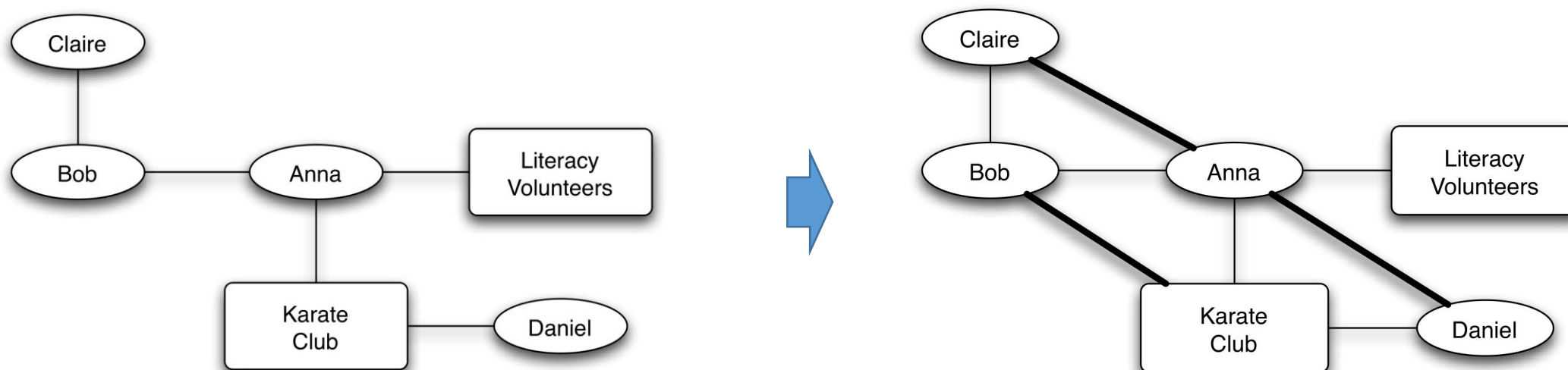
- 采用最基本的二部图描述节点与社团的关系
  - 此类网络可以推广至节点与任意属性（标签）的关系
- 通过追踪一段时间内归属网络的变化，可以评估节点之间同质现象是如何体现的



- 节点的归属与成因

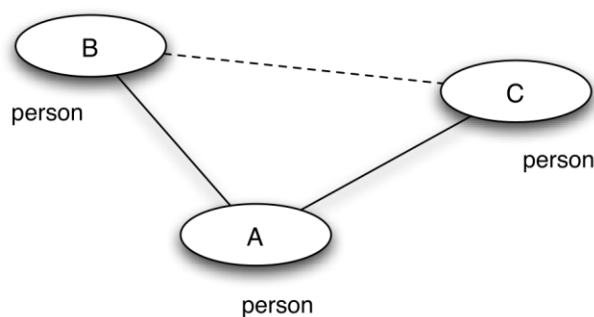
- 我们先从最基本的一类网络：节点的归属网络谈起

- 归属网络中，人与人的社交关系和人与社团的归属关系出现了“协同演化”现象

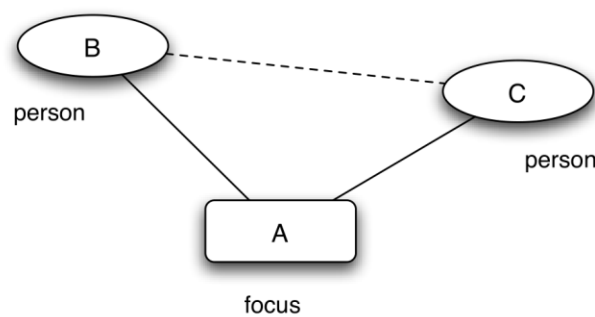


- 节点的归属与成因

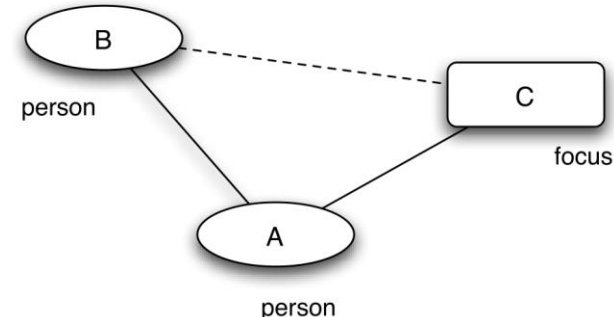
- 先前讨论链接生成时，我们采用“三元闭包”的概念描述链接的起源
- 能否套用“三元闭包”思想描述这种联合演化的现象？
  - 将三元闭包推广至异构网络：三类不同的“三元闭包”及其不同的作用机制



(a) *Triadic closure*



(b) *Focal closure*

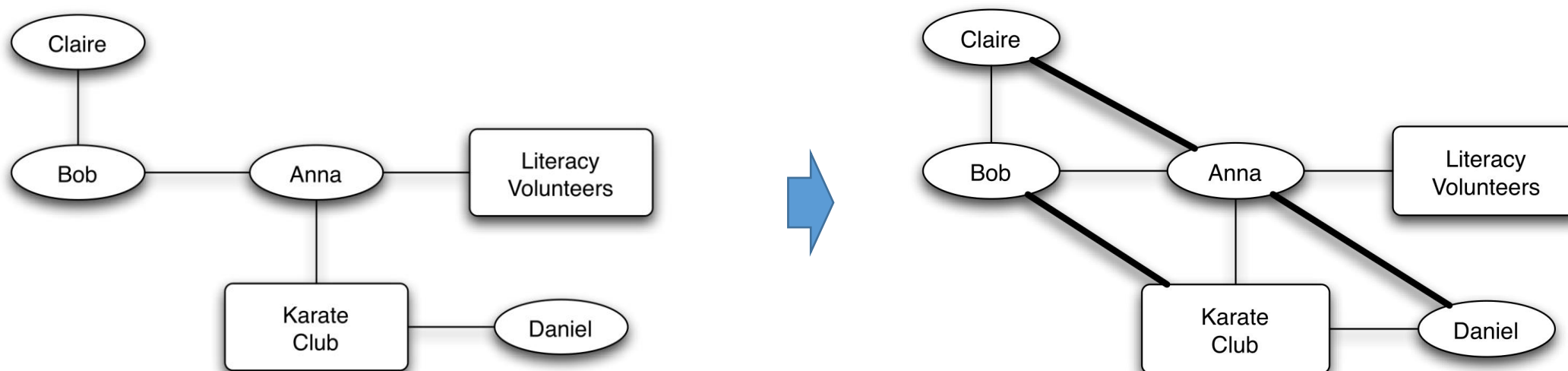


(c) *Membership closure*

- 节点的归属与成因

- 我们先从最基本的一类网络：节点的归属网络谈起

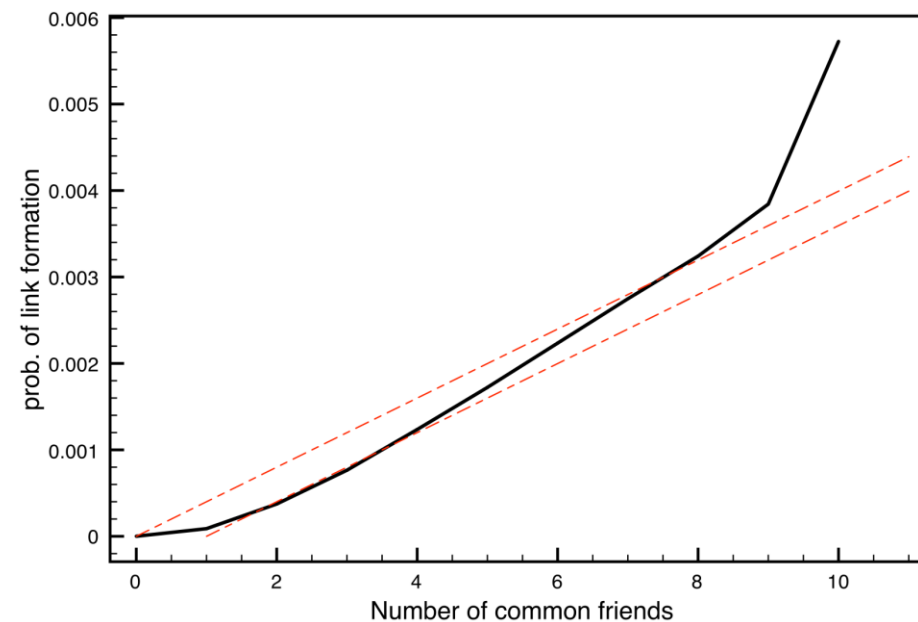
- 回过头来再看这种“协同演化”，我们会发现，新增的三条边分别对应三种“三元闭包”



- 节点的归属与成因

- 有关拓展三元闭包的若干量化讨论：究竟作用强度如何？

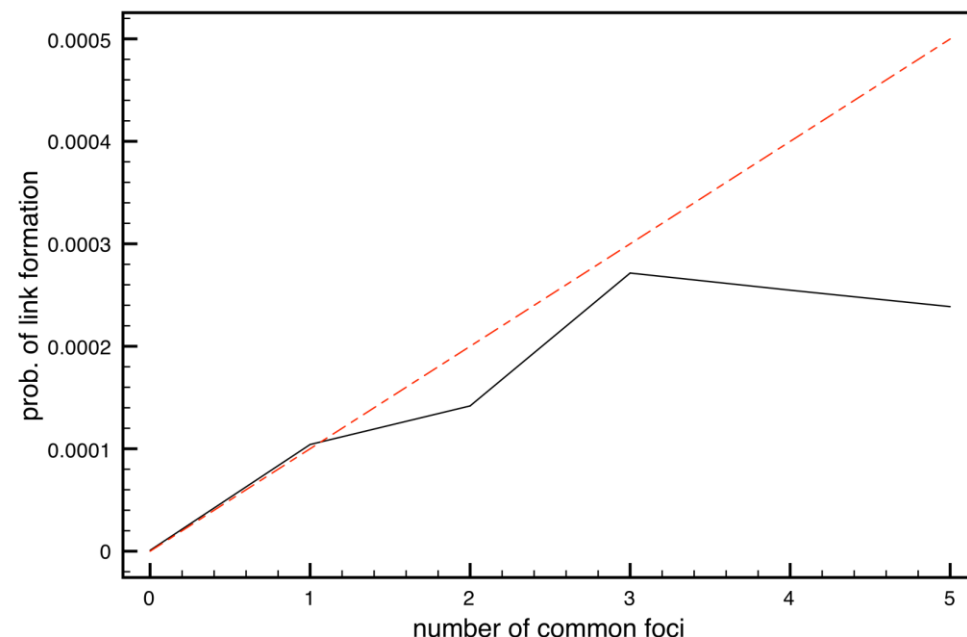
- 讨论（1）共同好友数的影响
- 从右图来看，随着共同好友增加，建立连接的几率显著上升
  - 超过一定阈值后的“上翘”现象
  - 与之前“链接预测”的基本假设一致



- 节点的归属与成因

- 有关拓展三元闭包的若干量化讨论：究竟作用强度如何？

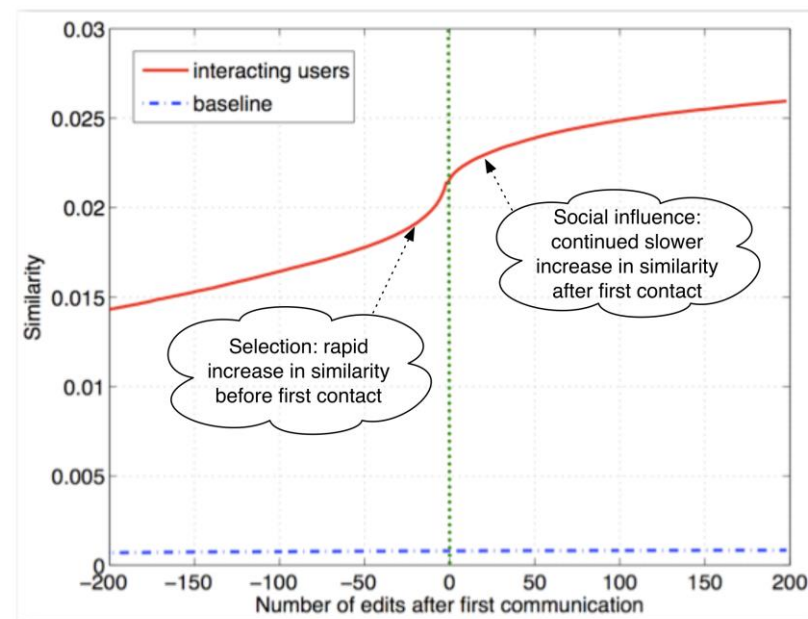
- 讨论（2）共同社团数的影响
- 从右图来看，随着共同社团数增加，建立连接的几率呈现先升后降的趋势
  - 为什么后期会下降？
  - 如果将社团改为共同属性/标签，是否存在类似的现象？



- 节点的归属与成因

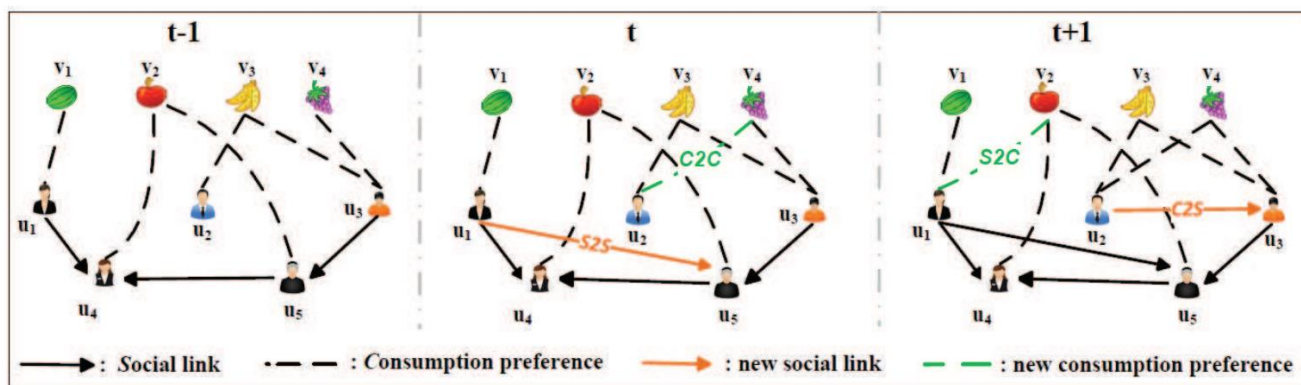
- 有关拓展三元闭包的若干量化讨论：究竟作用强度如何？

- 讨论 (3) 社会选择 v.s. 社会影响
- 右图为Wikipedia上两个编辑在建立社交联系前后，共同编辑的页面占比的变化
  - 建立连接前，相似性有个快速积累期
  - 建立连接后，占比仍在上升，但速度减缓
    - 社交影响依然存在！



## • 节点的归属与成因

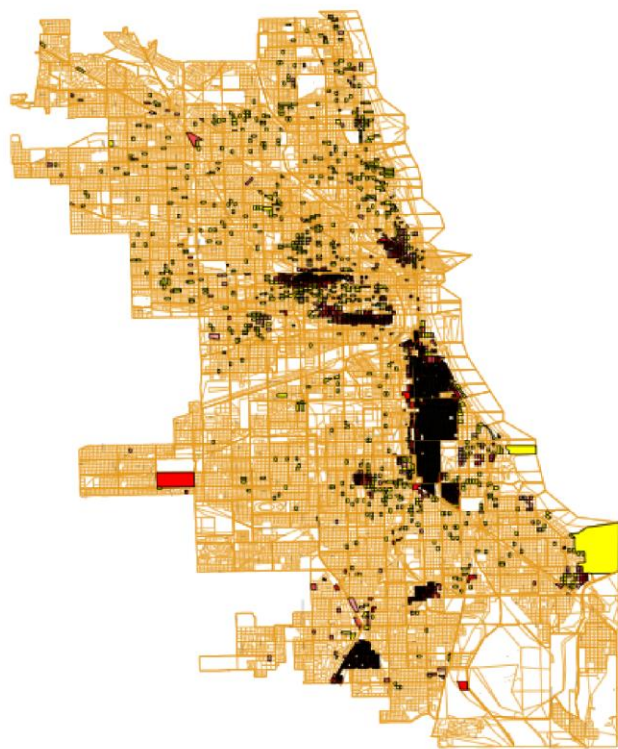
- 事实上，类似的“协同演化”思想在社交推荐中有着广泛的应用
  - 节点之间的相似度将反应在节点之间的新增关联上
  - 而节点之间的关联又将反作用于节点的后续行为
    - 鸡生蛋，蛋生鸡，不断强化节点之间的同质性现象



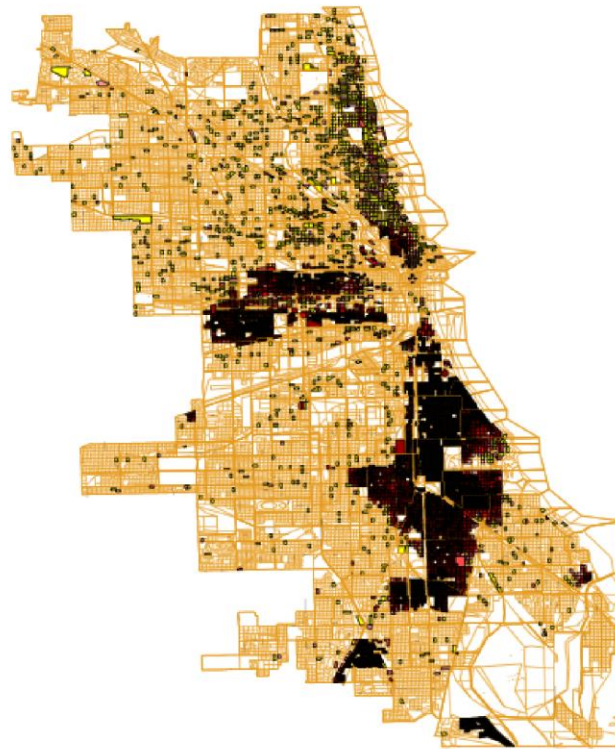
Explanations of A2B

| A2B | Explanations            |
|-----|-------------------------|
| C2C | Collaborative Filtering |
| S2C | Social Influence        |
| S2S | Node Proximity          |
| C2S | Homophily Effect        |

- 节点的隔离
- 节点之间的“社会选择”现象，可能以一种较为激烈的形式呈现
  - 人们倾向于与相似的节点在一起，从而表现为不同类节点之间的隔离现象



(a) *Chicago, 1940*



(b) *Chicago, 1960*

## • 节点的隔离

### • 节点隔离中的“谢林模型”

- 如果节点周围的同类低于某个比例，则节点将进行迁移
- 比例对于迁移结果有何种影响？

|     |     |    |     |      |     |
|-----|-----|----|-----|------|-----|
| X1* | X2* |    |     |      |     |
| X3  | O1* |    | O2  |      |     |
| X4  | X5  | O3 | O4  | O5*  |     |
| X6* | O6  |    |     | X7   | X8  |
|     | O7  | O8 | X9* | X10  | X11 |
|     |     | O9 | O10 | O11* |     |



|     |    |    |      |     |     |
|-----|----|----|------|-----|-----|
|     |    |    |      |     |     |
| X3  | X6 | O1 | O2   |     |     |
| X4  | X5 | O3 | O4   |     |     |
|     | O6 | X2 | X1   | X7  | X8  |
| O11 | O7 | O8 | X9   | X10 | X11 |
|     | O5 | O9 | O10* |     |     |

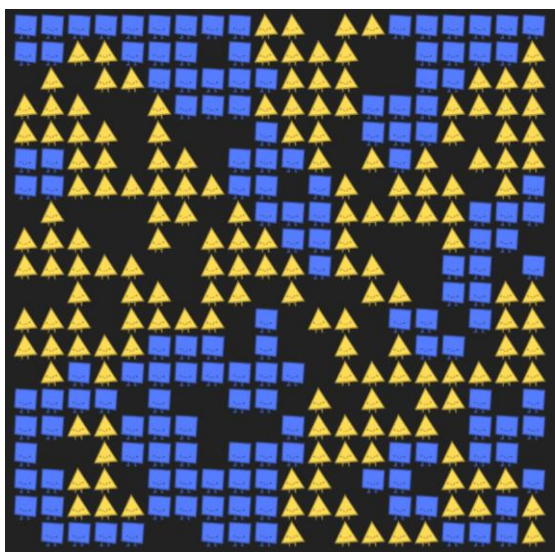
(a) An initial configuration.

(b) After one round of movement.

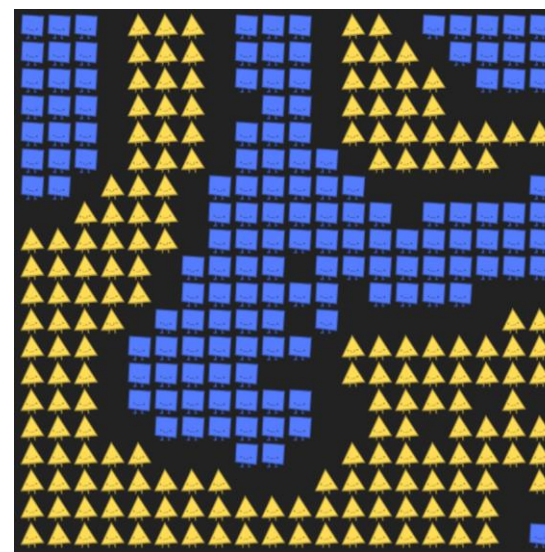
- 节点的隔离

- 节点隔离中的“谢林模型”

- 比例对于迁移结果有何种影响？显然，比例越高，“隔离”现象越明显
  - 可自行参考<https://ncase.me/polygons/> 进行实验



← 比例为33%的情况



比例为66%的情况→

- 网络节点同质性
  - 节点归属与节点隔离现象
- 信息级联
  - 节点的“随大流现象”及其数学成因
  - “沉默的螺旋”
- 基本传播模型
  - 传播的博弈视角
- 传染病模型

- **从同质性到信息级联**

- 小时候听过的小故事之二：三人成虎

- “三人言市有虎，王信之乎？” 王曰：“寡人信之矣”



- 从同质性到信息级联

- 现代版的“三人成虎”：你为什么在仰望天空？

- Milgram（还记得他不？）在20世纪60年代的实验

- 当一个人在街头仰望天空的时候，少数路人会停下来一起盯着天空看
    - 当15个人一起仰望天空的时候，45%的路人会停下来

- ✓ 从众现象普遍存在！

45度角仰望天空



- 从同质性到信息级联

- 人们行为中的“随大流”现象

- 两家饭店，A熙熙攘攘，B门可罗雀，你选择哪一家？

- People's Choice, 品质保证

- 大众的选择真的适合自己么？

- 此时，我们说出现了“群集”（Herding）或“信息级联”（Information Cascade）现象

- 信息级联体现了人们观察他人并影响自己决策的过程，并且这种过程并不是“盲目”的



- **信息级联现象**

- 信息级联（Information Cascade），直译为“信息瀑布”
  - “Cascade”，指像瀑布一样从高处倾泻下来
  - 这个词用来描述人们在信息流中的“从众”行为，非常生动形象
  - 信息级联现象，可以描述人们从他人行为中获取消息/进行决策的这一过程
    - 这个过程具有鲜明的“传播”特性



- **信息级联现象**

- 回到我们先前的阐述：为什么这种从众行为并不是“盲目”的？
- 一个简单的群集实验：
  - 有红、蓝两种颜色的纸条，比例未知
  - 每个人轮流抽一张纸条，然后根据手中的纸条，判断哪种颜色的纸条更多？



- **信息级联现象**

- 回到我们先前的阐述：为什么这种从众行为并不是“盲目”的？
- 一个简单的群集实验：
  - 有红、蓝两种颜色的纸条，比例未知
  - 每个人轮流抽一张纸条，然后根据手中的纸条，判断哪种颜色的纸条更多？

考虑一种特殊情况：

如果你是第三个人，前两个人都说是蓝色，但你手上是红色的字条  
你，选择红色，还是蓝色？



- 信息级联现象

- 什么因素影响了我们的判断？

- 如果用贝叶斯的观点来看待这一过程，我们可以将前人的判断视作某种“先验”
  - 第一个人判断之前，红蓝两种颜色的概率可视为均为0.5
  - 但当第一个人做出判断后，条件概率发生了变化
    - ✓ 具体计算详见课本16.4（注意书中的前提条件：盒子中一共只有三个小球）
  - 在这种情况下，第三个人选择“从善如流”，将获得更大的正确机会



- 信息级联现象

- 什么因素影响了我们的判断？

- 由此，我们可以大致总结一下人们合理的决策方式
  - 对于第一个人来说，由于没有先验知识，他将根据自己的观察来决策
  - 对于第二个人来说，他很有可能将根据自己的观察来决策
    - ✓ 如果他的观察与第一个人相同，结论不言而喻
    - ✓ 如果他的观察与第一个人不同，则选择哪种观点没有区别，不妨按自己的观察
  - 对于第三个人来说，由于前两个人都依赖于自己的观察
    - ✓ 此时，第三个人相当于有三个观察信号，可以少数服从多数
  - 由此，可以进一步推广到第N个人的情况



- 信息级联现象

- 从前面的例子中，我们大致可以得到什么结论？
  - 首先，“级联”不一定就是正确的
    - 人多的饭店，不一定合自己的口味；接受一个选项，可能只是依赖于少数有偏样本
  - 其次，“级联”在开始可能只依赖于少数样本
    - 但有趣的是，级联开始后，人们的个人信息/观察可能就被群体规律所取代了
  - 最后，“级联”可能是脆弱的
    - 如果对立信息累积到一定程度，可能颠覆已有的级联



## • 信息级联现象

- 从前面的例子中，我们大致可以得到什么结论？
  - “级联”的特点，和我们之前介绍的“富者愈富”的起步阶段有何相似与不同？
  - “级联”在开始可能只依赖于少数样本
    - 但有趣的是，级联开始后，人们的个人信息/观察可能就被群体规律所取代了
    - ✓ 与“富者愈富”类似，同样都是依赖少数样本起步
  - “级联”可能是脆弱的
    - 如果对立信息累积到一定程度，可能颠覆已有的级联
    - ✓ 与“富者愈富”不完全一致，后者一旦达到某个阈值则无法被颠覆



- 小拓展：沉默的螺旋

- 随着级联的发生，一种声音逐渐成为主流，而另一种逐渐淡化乃至消亡
  - 这种消亡有主动“随大流”的因素，也有被动因素
    - 与大众观点相悖时，可能往往无人理会甚至遭到攻击，从而抑制了，参与讨论的意愿
  - 这种现象可能会造成一些“虚假的繁荣”
    - 例如，2016年某国大选的民调



- **小拓展：沉默的螺旋**

- “沉默的螺旋”——基于前述观察所得的政治学/传播学理论
  - 人们在表达自己想法和观点的时候，如果看到自己赞同的观点受到广泛欢迎，就会积极参与进来，这类观点就会越发大胆地发表和扩散；而发觉某一观点无人或很少有人理会（有时会有群起而攻之的遭遇），即使自己赞同它，也会保持沉默。



- 小拓展：沉默的螺旋

- “沉默的螺旋”——基于前述观察所得的政治学/传播学理论
  - 意见一方的沉默造成另一方意见的增势，如此循环往复，便形成一方的声音越来越强大，另一方越来越沉默下去的螺旋发展过程。
  - “沉默的螺旋”背后，是人们力图避免由于单独持有某些态度而产生孤立的心理



然而，沉默螺旋也不是普遍作用！

比如：标新立异的观点

- 小拓展：沉默的螺旋

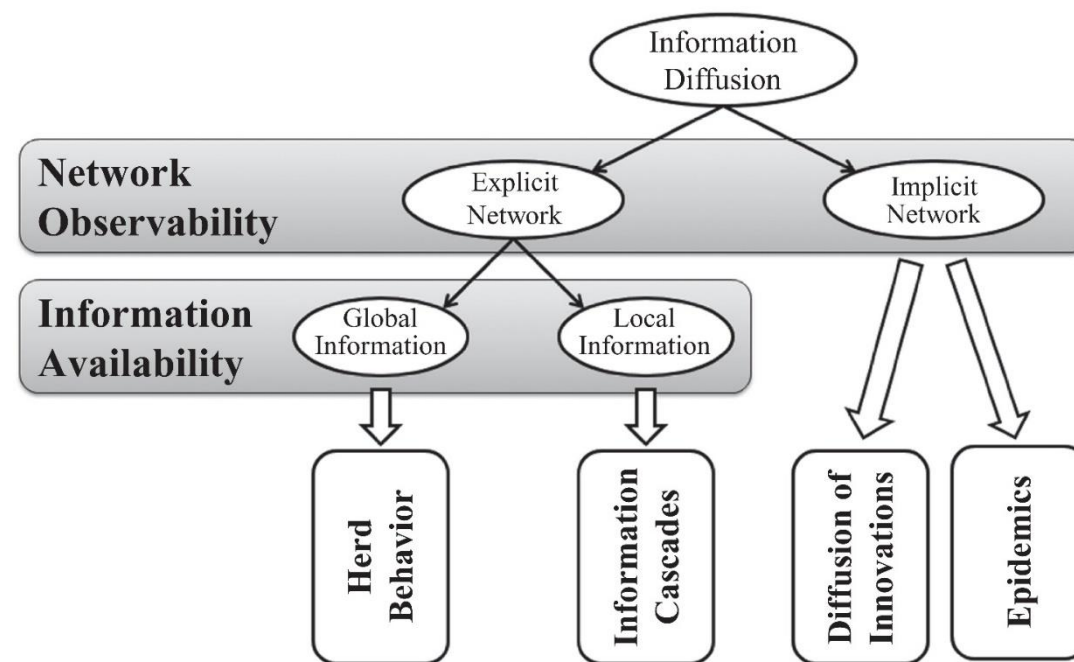
- “沉默的螺旋” 会扼杀群体智慧
  - 相比于话轮转换分布更均衡的群体，由少数个体主导对话的群体拥有更低的群体智慧。
  - 因此，首要任务是让信息流动起来！否则再好的想法也不能转化为智慧



- 网络节点同质性
  - 节点归属与节点隔离现象
- 信息级联
  - 节点的“随大流现象”及其数学成因
  - “沉默的螺旋”
- **基本传播模型**
  - 传播的博弈视角
- 传染病模型

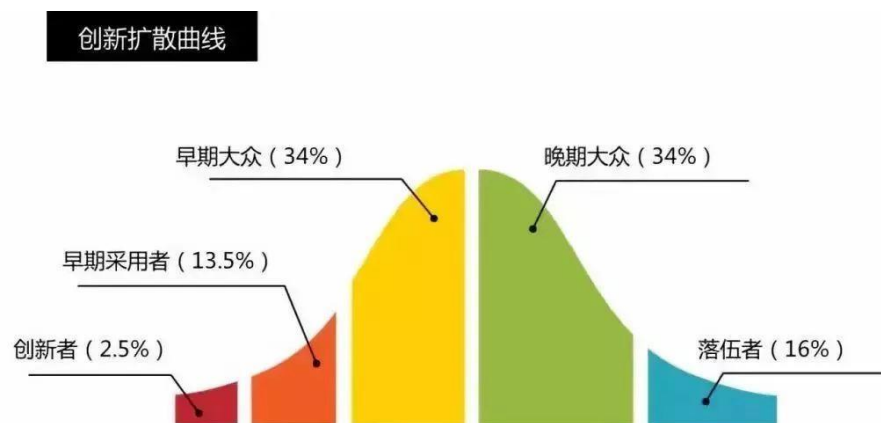
## • 如何描述传播过程

- 前一节中信息级联的例子，为我们描述了基本的信息扩散过程
- 如何为这种信息扩散的过程提供基于网络结构的量化建模？



## • 引子：创新扩散模型

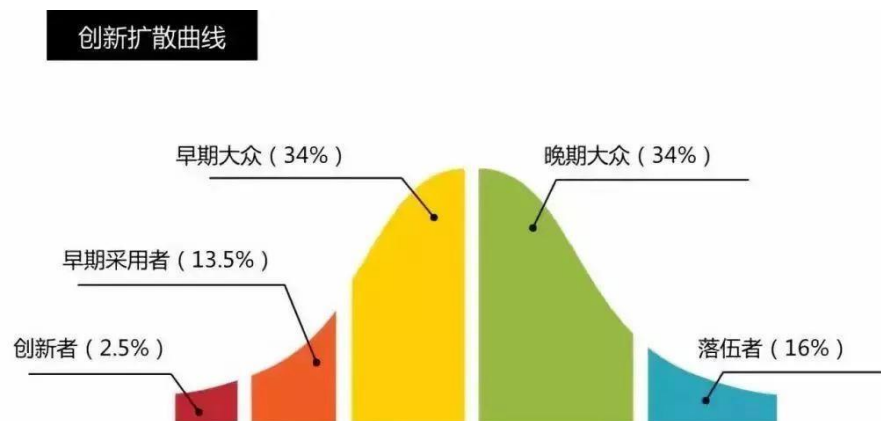
- 如何描述一种新技术在社会中的扩散现象？
  - 例如，在一个实验室中，原本大家都在用Thinkpad笔记本
  - 某一天你发现，某位同事换成了Macbook
  - 随着时间推移，越来越多的人开始使用Macbook，但仍有人保持不变或在观望



如何定量描述这种现象？

## • 引子：创新扩散模型

- 创新扩散模型：将技术的所有采纳者划分为5大类（如下图所示）
  - 其中，意见领袖作为创新者或早期采用者，往往起到对于新技术的引领或推动作用
  - 两个参数在技术推广中至关重要：
    - P：创新系数，即诱导人们使用这种技术的能力
    - Q：模仿系数，即未使用该技术的人受采用者影响跟风使用的可能性



- **更为一般化的传播模型**

- 然而，这种扩散毕竟不是“一帆风顺”的
  - 无论是新技术还是新消息，在传播扩散过程中，总会有人接受，有人排斥，有人固执己见
  - 如何用博弈的视角来描述这种接受与排斥的理由？



## • 更为一般化的传播模型

### • 网络协调博弈：从收益的视角看传播

- 假如现在，我们有A、B两种信息的选择可能
- 相应的，我们有v、w两个相连的节点，其信息回报如下：
  - 如果都接受A，则回报为 $a > 0$
  - 如果都接受B，则回报为 $b > 0$
  - 如果两个人接受不同的信息，则回报都为0
  - 暂不考虑不接受任何信息的可能

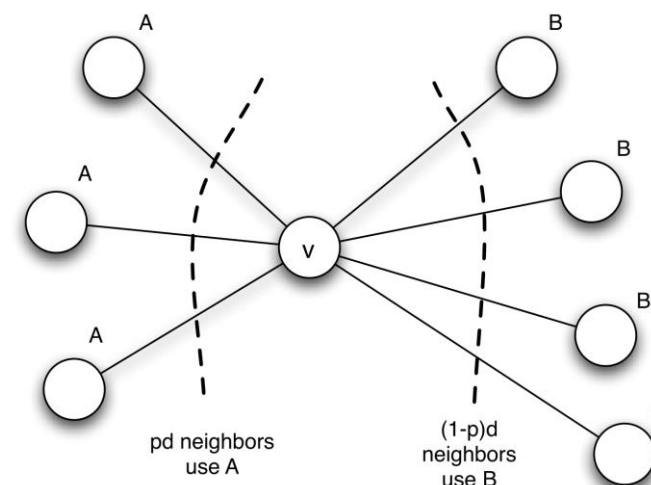
|     |   | $w$    |        |
|-----|---|--------|--------|
|     |   | A      | B      |
| $v$ | A | $a, a$ | $0, 0$ |
|     | B | $0, 0$ | $b, b$ |

Figure 19.1:  $A$ - $B$  Coordination Game

## • 更为一般化的传播模型

### • 网络协调博弈：从收益的视角看传播

- 在上文这种简单的博弈环境下，显然，我们只需要根据  $a$  与  $b$  的大小进行判断即可
- 然而，现实网络并非  $v$  和  $w$  的二人世界
- 对于  $v/w$  来说，如果一部分邻居选择A，一部分邻居选择B，它应该如何做出选择？



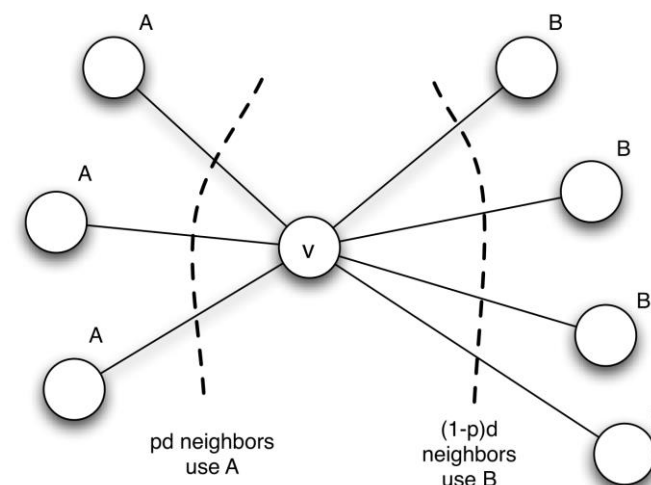
## • 更为一般化的传播模型

### • 网络协调博弈：从收益的视角看传播

- 回顾一下信息级联描述过程中我们的“从善如流”
- 此时的思路是类似的，区别在于我们用收益进行了加权
- 假定邻居总数为  $d$ ，选择A的邻居概率为  $p$ ，则考虑

$$pda \geq (1-p)db, \quad \text{或} \quad p \geq \frac{b}{a+b}.$$

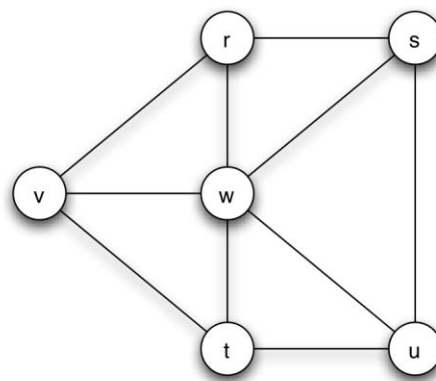
- 此时，选择信息A的收益更高



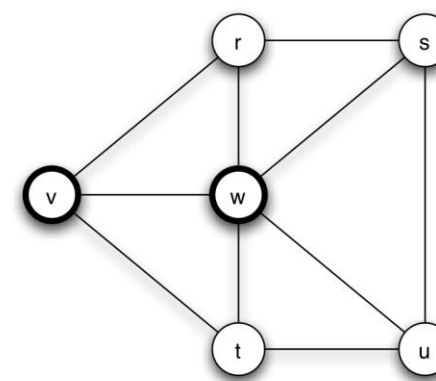
# • 更为一般化的传播模型

## • 网络协调博弈：从收益的视角看传播

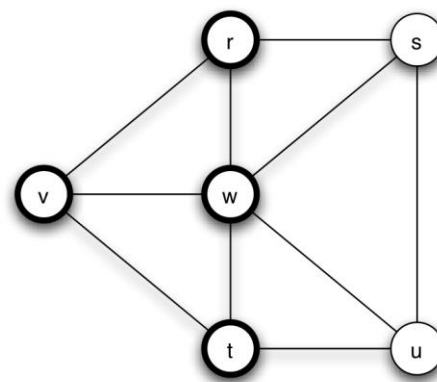
- 此时,  $\frac{b}{a+b}$  是一个重要的比例, 我们设为  $q$
- 可知, 如果一个节点至少有比例为  $q$  的邻居选择了A, 则该节点同样将从B转为A
- 我们来看右图的传播过程 (假设  $a = 3, b = 2$ )



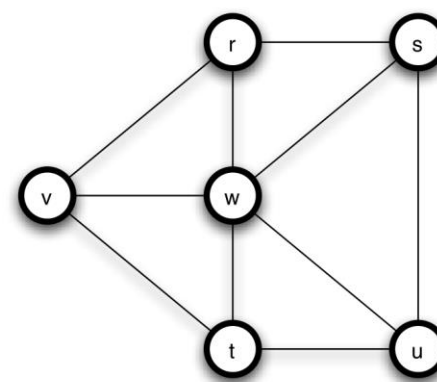
(a) The underlying network



(b) Two nodes are the initial adopters



(c) After one step, two more nodes have adopted



(d) After a second step, everyone has adopted

- 更为一般化的传播模型

- 网络协调博弈：从收益的视角看传播

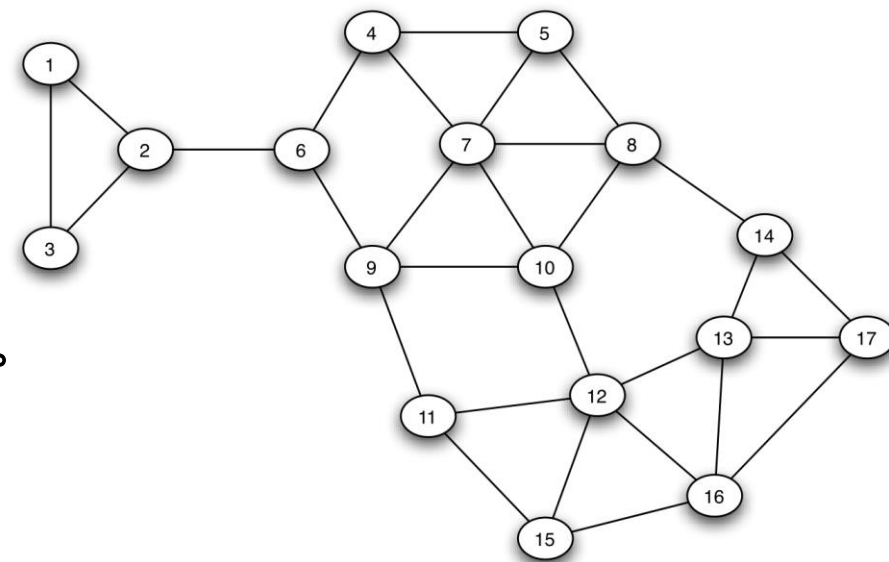
- 前例有一个有趣的现象：虽然种子节点的初始影响力不够，但通过扩散扩大了影响
- 类似的现象同样可以在右下图观察到，假定7、8为种子节点来传播A

- 先影响5、10

- 再影响4、9，最后影响6

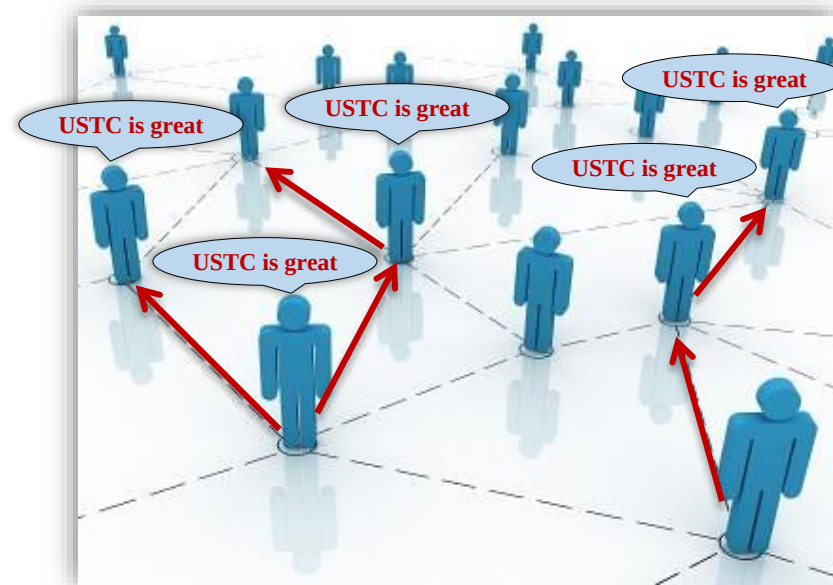
- 这样一种级联被称作采用A的级联，其中：

- 如果图中所有节点都采纳了A，则称为完全级联。



## • 更为一般化的传播模型

- 网络协调博弈：从收益的视角看传播
- 级联过程对于“营销”的启发？
  - 最好的营销是提升信息的收益，即  $a$ 
    - $a$  的提升将导致比例阈值的降低，更易传播
    - 当然， $b$  的降低也会间接促进  $a$  的传播
  - 如果  $a$  很难提升，则应着手改进传播策略
    - 重要的思路：诱导关键人物弃B投A
    - 影响力最大化问题！



## • 小拓展：网络中聚簇对于级联的影响

- 先前，我们曾多次提到社团的概念，它将如何影响级联过程？
  - 我们先给出社团（聚簇）密度的概念：如果聚簇中每个节点，至少有比例为  $p$  的邻居节点也属于这个聚簇，则该聚簇的密度为  $p$ 
    - 例如，下图的聚簇密度为  $2/3$
    - 密度体现了社团的内聚性

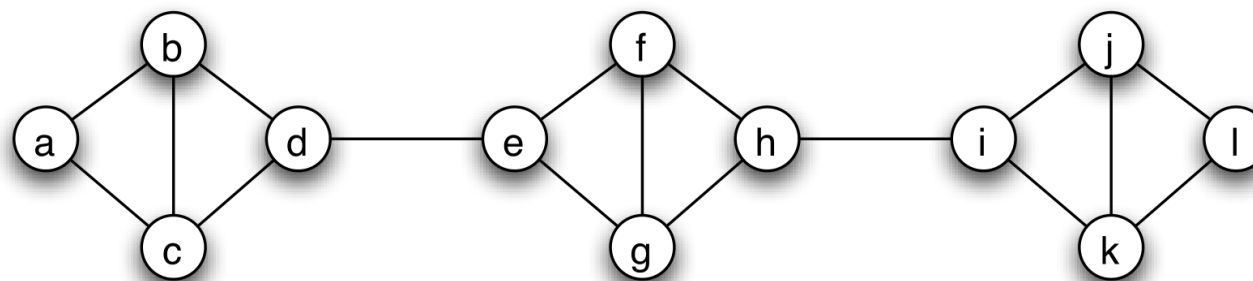
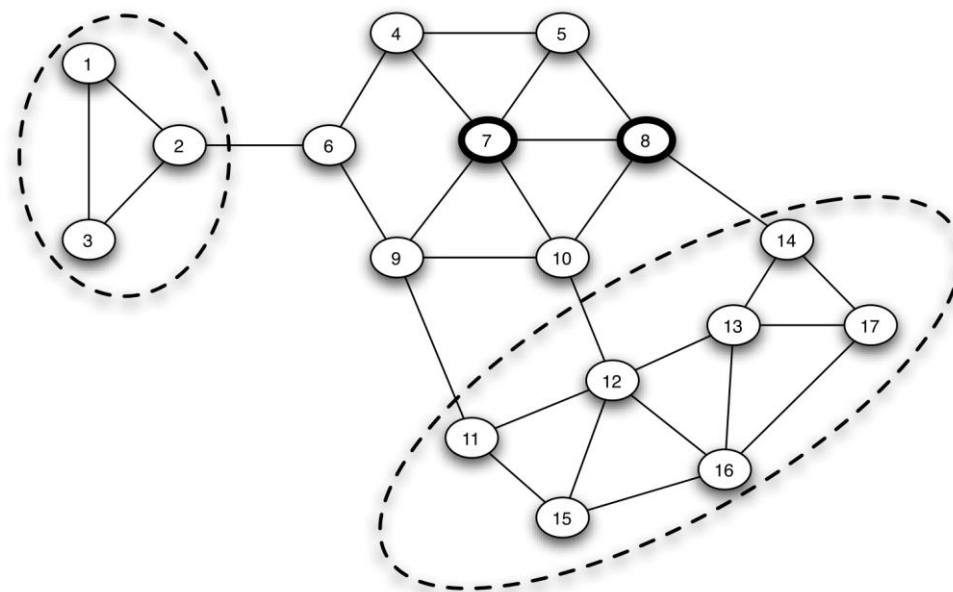


Figure 19.6: A collection of four-node clusters, each of density  $2/3$ .

## • 小拓展：网络中聚簇对于级联的影响

- 先前，我们与社团结构打了许多次交道，它将如何影响级联过程？
  - 回顾前例（右下角），我们发现以 $a = 3$ ,  $b = 2$ 的设定，图中有两个难以攻克的聚簇



事实上，

当级联面临一个高密度的聚簇时往往会停下来  
并且这是唯一导致级联停止的原因→

## • 小拓展的小拓展：聚簇、弱连接与级联

### • 回顾前一页的图，沟通聚簇之间的是什么？是弱连接！

- 我们先前提过，弱连接是重要的信息来源，可以沟通不同社团组织
- 事实上，从现实来看，弱连接可能未必能够“说服”人们接受某种信息/行为，但至少可以让人们听说某种信息，为接受做好铺垫
- 由此可见，弱连接是传递新消息/新事物的有力途径，但在促使节点采取行动时力度不够

#### • 信息传播与信息覆盖的区别？

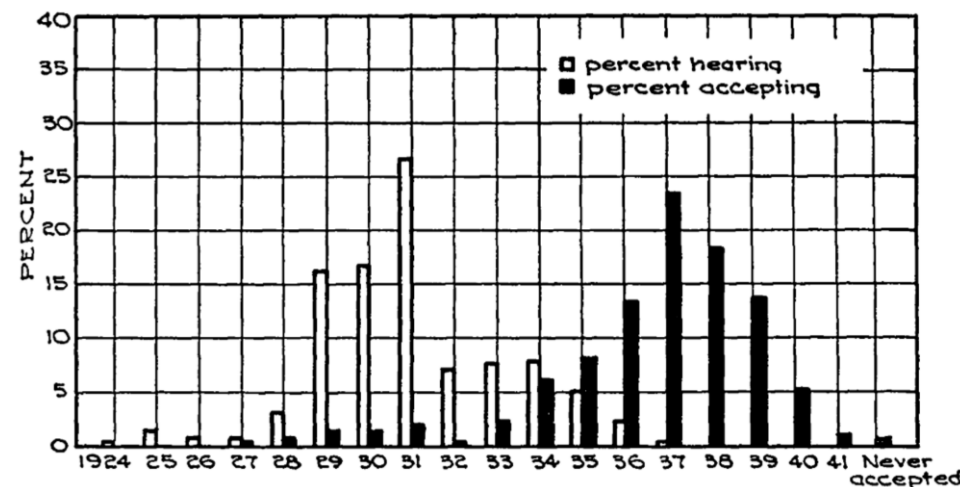


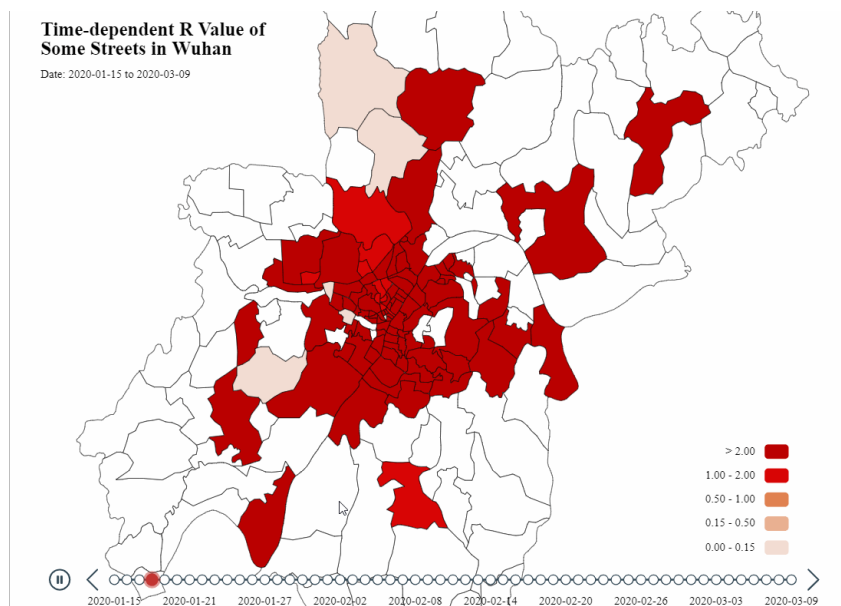
Figure 19.10: The years of first awareness and first adoption for hybrid seed corn in the Ryan-Gross study. (Image from [358].)

- 网络节点同质性
  - 节点归属与节点隔离现象
- 信息级联
  - 节点的“随大流现象”及其数学成因
  - “沉默的螺旋”
- 基本传播模型
  - 传播的博弈视角
- 传染病模型

- 疾病与传播网络

- 另一类面向隐性网络结构的重要模型：传染病模型

- 然而事实上，我们在绪论时已经和它打过交道了



- 疾病与传播网络

- 传染病模型在关注什么？

- 接触网络

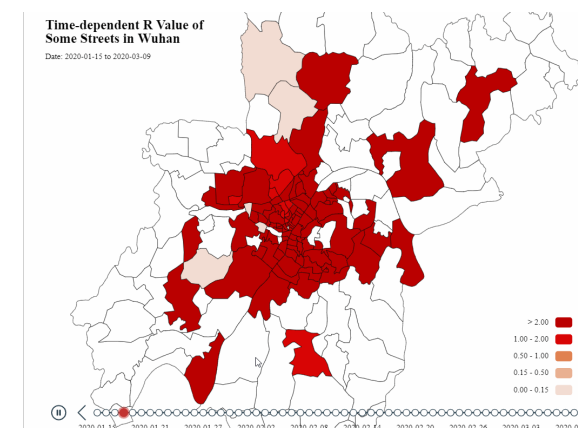
- 多大范围（规模）可能接触？

- 传染路径

- 哪些人有可能会被传染？

- 传播时间

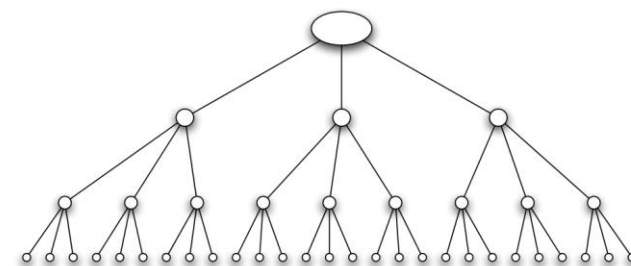
- 疾病延续的时间会有多长？
    - 是否需要采取措施，会不会自生自灭？



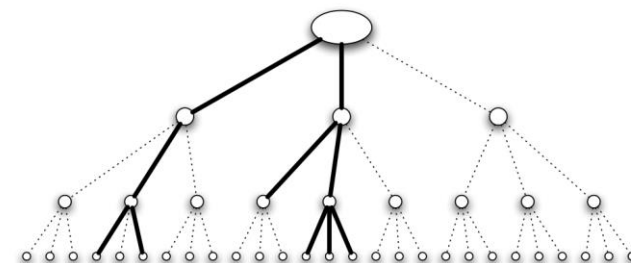
## • 疾病与传播网络

### • 我们先来看最基本的分支过程

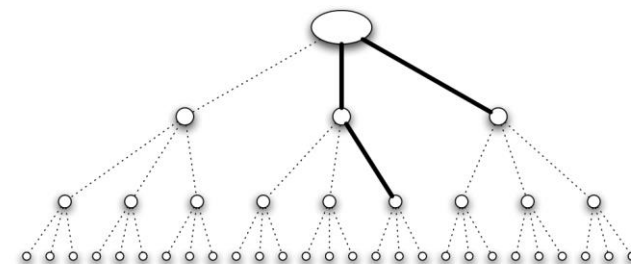
- 假定一个人携带病菌进入人群，并以独立的概率  $p$  将该疾病传染给遇到的每一个人
- 再假定，他将在该期间遇到  $k$  个人，而这  $k$  个人又将各自遇到  $k$  个人，以此类推
  - 小世界现象里的“理想下线模式”又出现了？



(a) The contact network for a branching process



(b) With high contagion probability, the infection spreads widely

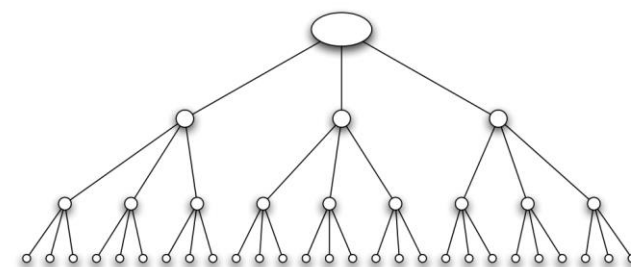


(c) With low contagion probability, the infection is likely to die out quickly

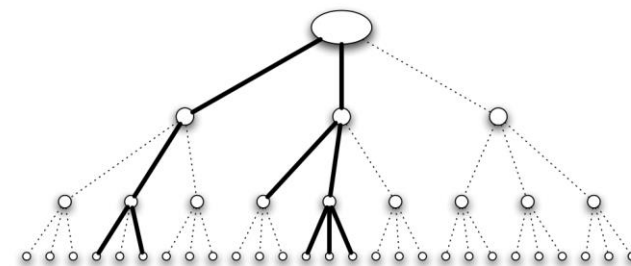
## • 疾病与传播网络

### • 我们先来看最基本的分支过程

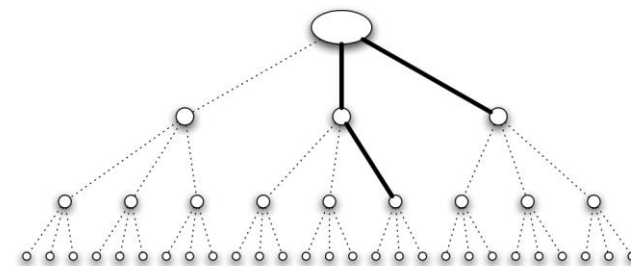
- 为什么同样是传播，有的越传越多，有的逐渐消亡？
- 这个过程包含着一个重要的指数：基本再生数 $R_0$
- 其计算公式为  $R_0 = p * k$
- 一个重要的断言：
  - 如果  $R_0 < 1$ ，则疾病将在有限的疫情波后消亡。
  - 反之，如果  $R_0 > 1$ ，则疾病将持续在每一波中以大于 0 的概率至少传染 1 个人
- 顺便，新冠肺炎期间 $R_0$ 这个数字经常在新闻中出现。



(a) The contact network for a branching process



(b) With high contagion probability, the infection spreads widely



(c) With low contagion probability, the infection is likely to die out quickly

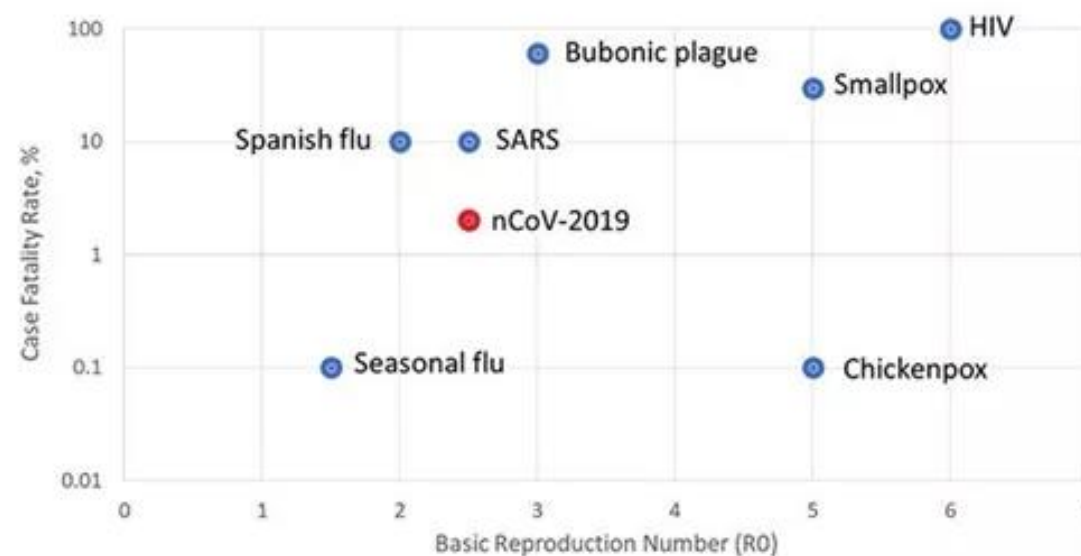
## • 疾病与传播网络

### • 我们先来看最基本的分支过程

- 这个过程包含着一个重要的指数：基本再生数 $R_0$

➤ 部分常见疾病的基本再生数/死亡率情况

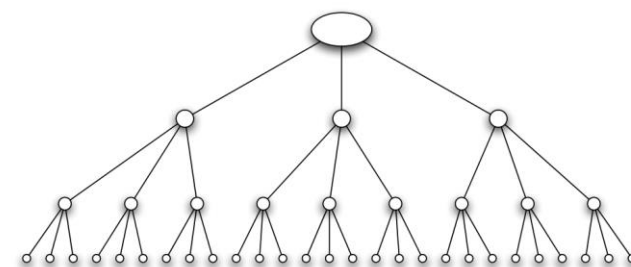
- ◆ 艾滋病（未治疗），全球的 $R_0$ 约为6，死亡率接近100%。
- ◆ 天花， $R_0$ 为5，未接种者死亡率为30%
- ◆ 鼠疫， $R_0$ 为3，未治疗者死亡率为60%
- ◆ 新冠病毒（2020年初）， $R_0$ 约为2.5，死亡率约为2%



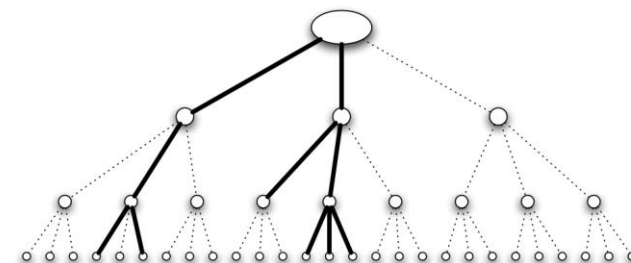
## • 疾病与传播网络

### • 我们先来看最基本的分支过程

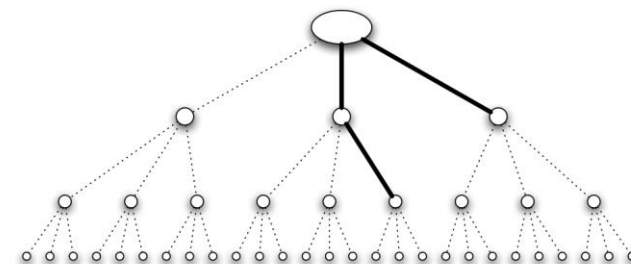
- 从总体来说，分支过程简单、易于计算，但实际上与“小世界”现象中的“理想情况”一样过于简陋
  - 首先，同样忽略了重要的重叠和三角关系
  - 其次，如果 $R_0$ 较大，传播速度将不断攀升，很快病毒会覆盖社会全体
    - 现实中，可能吗？



(a) The contact network for a branching process



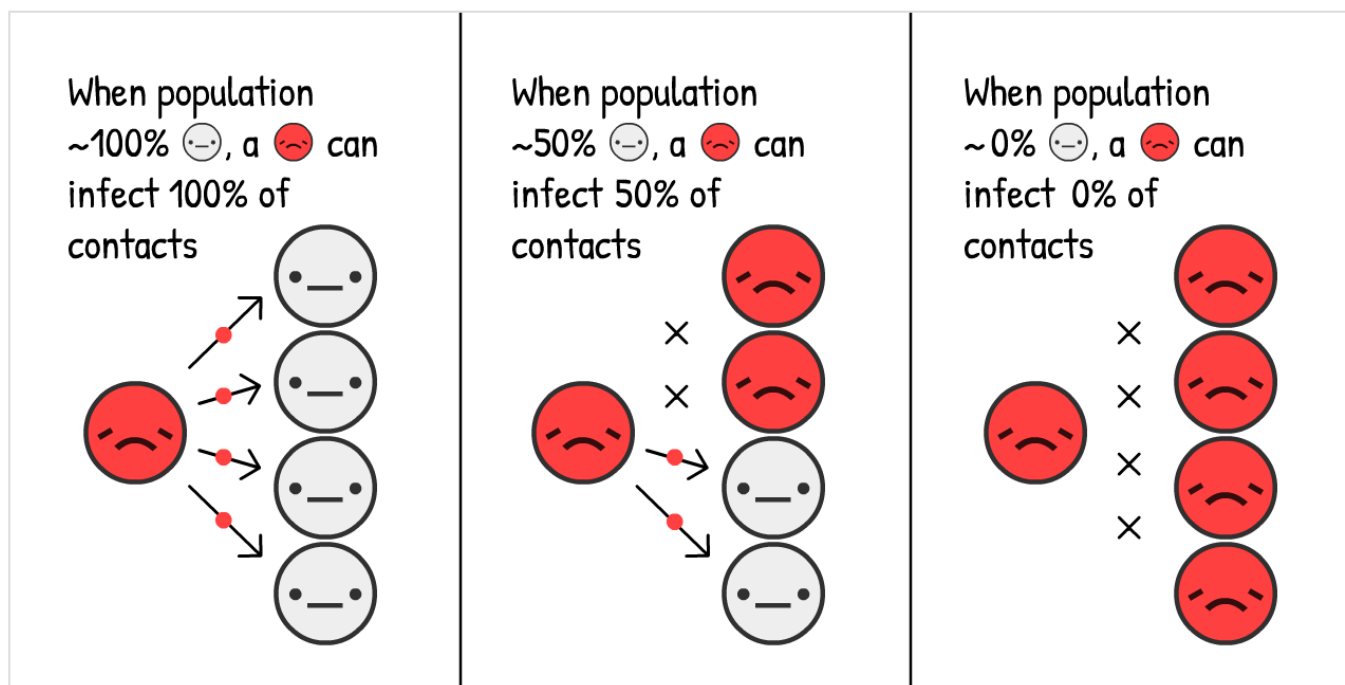
(b) With high contagion probability, the infection spreads widely



(c) With low contagion probability, the infection is likely to die out quickly

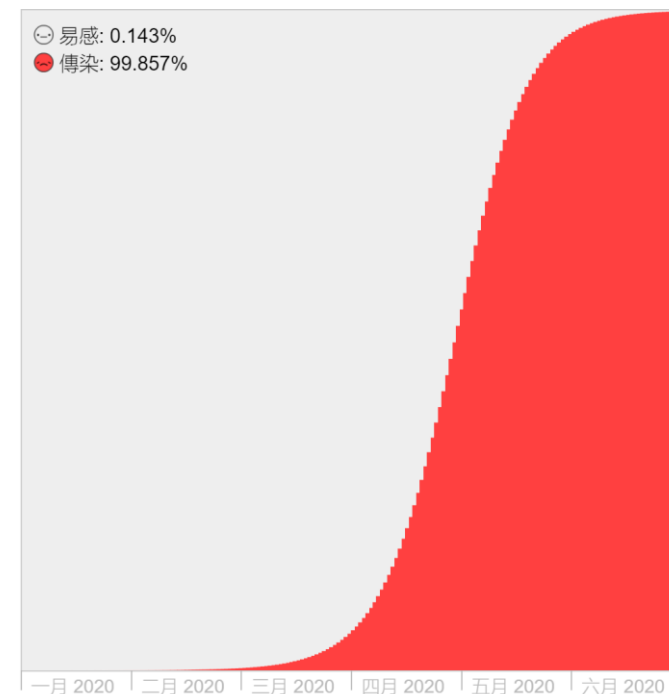
## • 基本的传染病模型：SI模型

- 一个基本的事实是，可被传染的健康者越来越少
  - 随着社会群体中患病者越来越多，传染一个新病患的难度事实上是在上升的



## • 基本的传染病模型：SI模型

- 一个基本的事实是，可被传染的健康者越来越少
  - 由此可见，正常的传播曲线，应该经历一个增速先上升，然后放慢的趋势
- 由此，我们有了第一类传染病模型
  - Susceptible-Infectious, SI模型
  - 其中，社会群体被分为两类：
    - 易感者 (Susceptible)：尚未被传染但可能被传染
    - 传染期 (Infectious)：已经被传染并会传染他人
  - 影响传播的参数：传染概率



## • 进阶的传染病模型：SIR模型

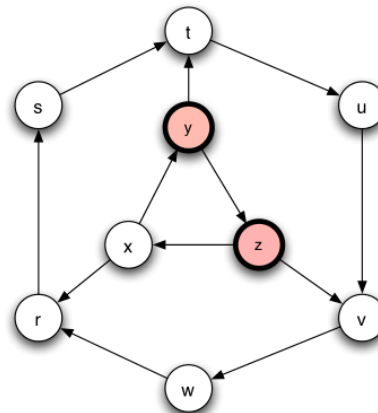
- SI模型的局限性：病人一旦感染就永远不会康复
  - 然而现实中，大多数疾病的患者都会康复（或死亡）而导致停止传播
- 因此，我们将传染病模型扩展如下
  - Susceptible-Infectious-Recovered, SIR模型
  - 其中，社会群体被分为三类：
    - 易感者 (Susceptible)：尚未被传染但可能被传染
    - 传染期 (Infectious)：已经被传染并会传染他人
    - 康复者 (Recovered)：不会传染他人且终身免疫



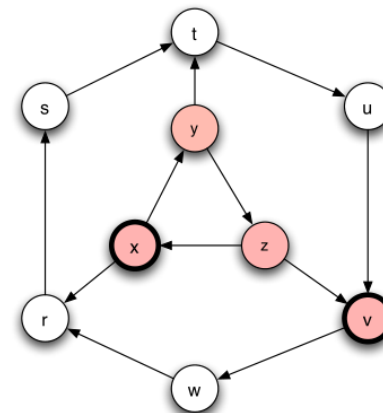
## • 进阶的传染病模型：SIR模型

### • SIR模型更为符合实际

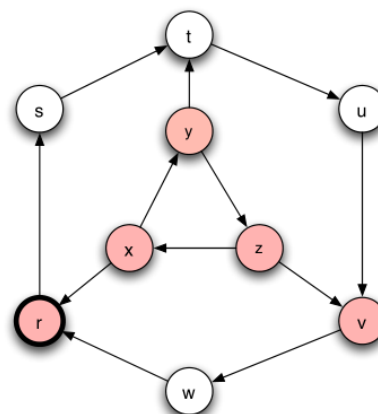
- 进入 I 阶段的节点仅在患病期间具有传染性，一旦痊愈（或死亡）则不再传染
- 此时，影响传染效果的，除了传染概率  $p$  之外，还有患病时间  $t$ 
  - 这就是为什么类似埃博拉病毒等难以传染（极短的  $t$ ）



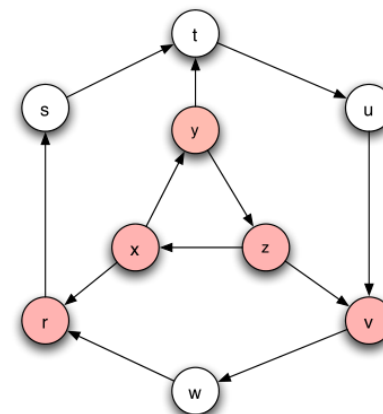
(a)



(b)



(c)

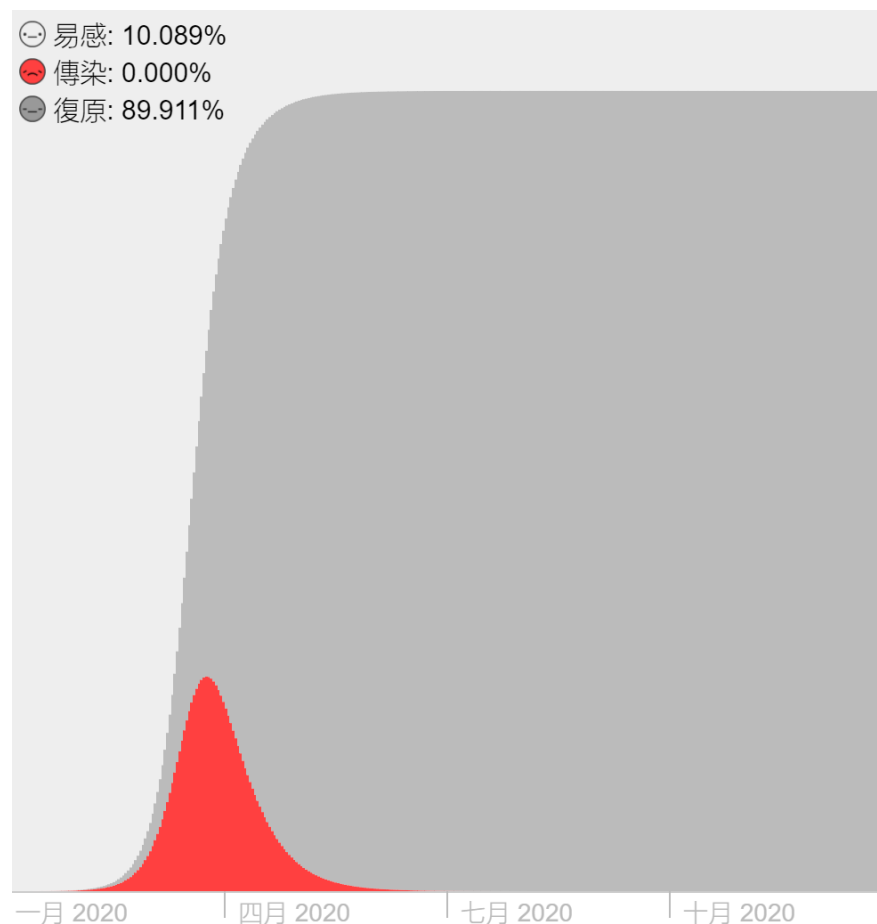


(d)

## • 进阶的传染病模型：SIR模型

### • SIR模型更为符合实际

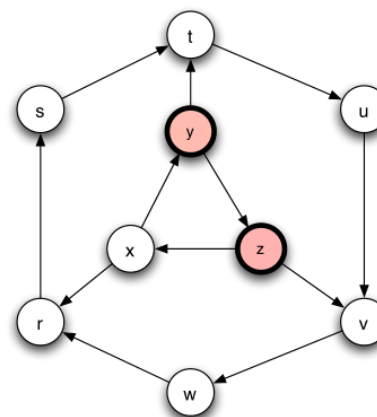
- 从传染的全过程来看，与SI模型类似，随着被传染群体的规模不断增大，传染新个体的难度也在上升
- 此时，患病的总数（包括已康复者）呈现类似SI的形式，但具有传染性（I 阶段）的人数达到峰值后很快下降
- 因此，SIR模型的传染必然停止！



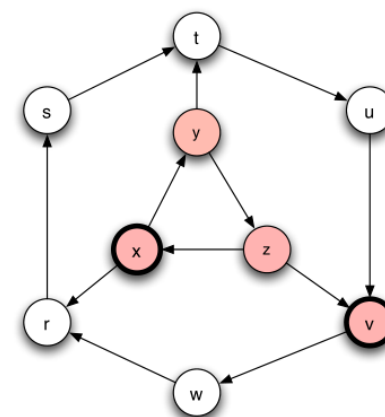
## • 进阶的传染病模型：SIR模型

### • 从图论视角看SIR模型

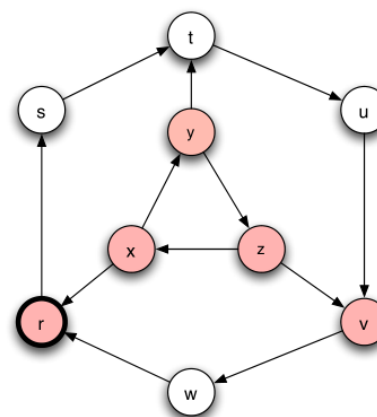
- 由于已康复个体可以终身免疫，因此在传染中，这些节点将形成网络的无效节点
- 另一方面，我们也可以将SIR视作静态过程
  - 考虑到所有传染都是相互独立的，我们可以  $p$  的概率对所有边抛硬币
  - 如果某条边被成功选中并具有传染能力，则视作“**开放边**”
  - 反之，则视作“**阻塞边**”



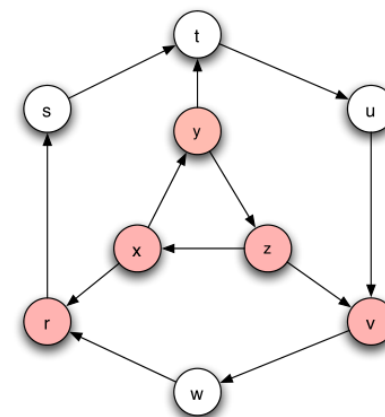
(a)



(b)



(c)

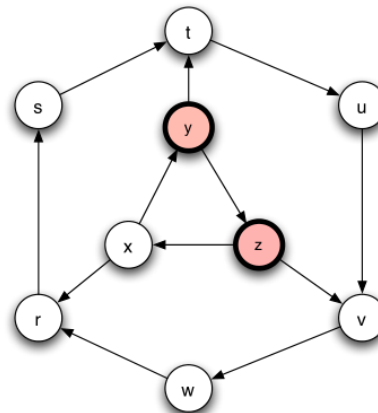


(d)

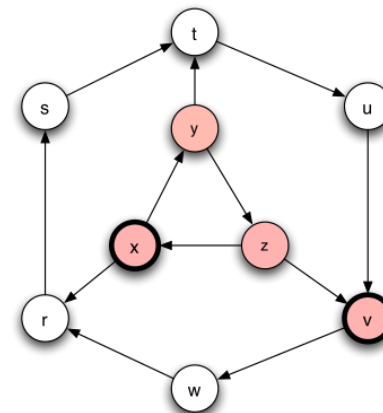
## • 进阶的传染病模型：SIR模型

### • 从图论视角看SIR模型

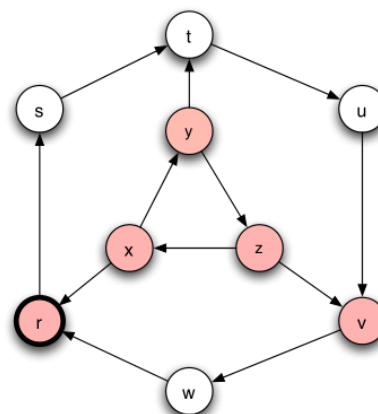
- 在这种设定下，某个节点被传染，当且仅当它到种子节点有一条全部由**开放边**组成的路径
- 在研究传播问题时，可达节点（可被传染的节点）的集合被称作Reverse Reachable Set (RR Set)



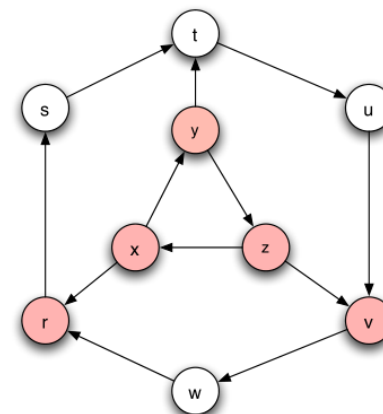
(a)



(b)



(c)

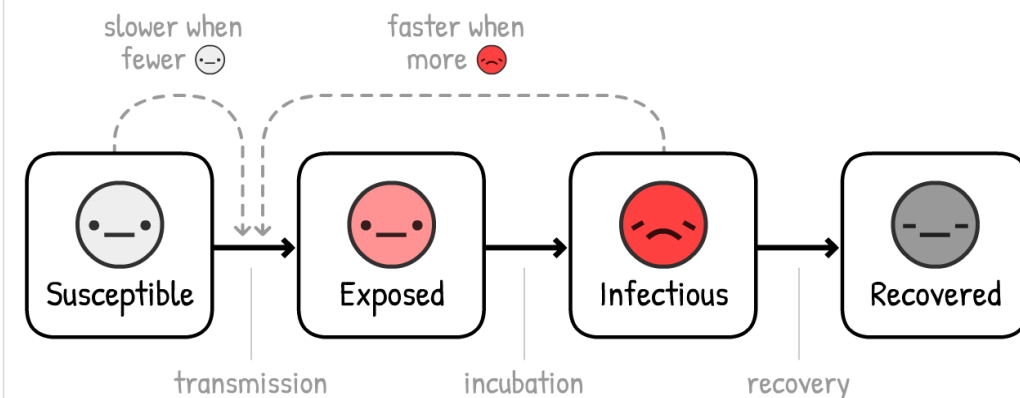
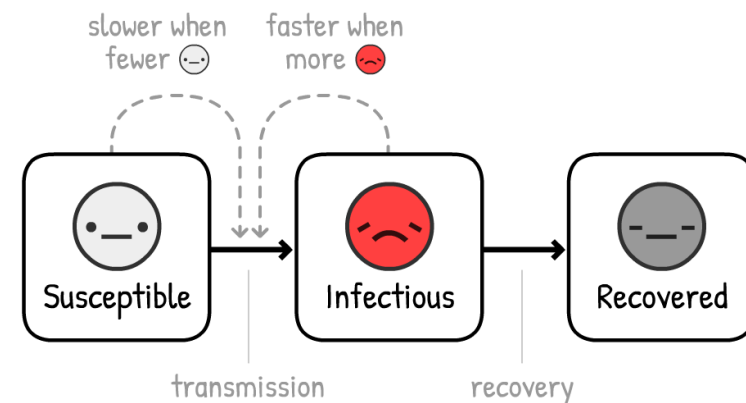


(d)

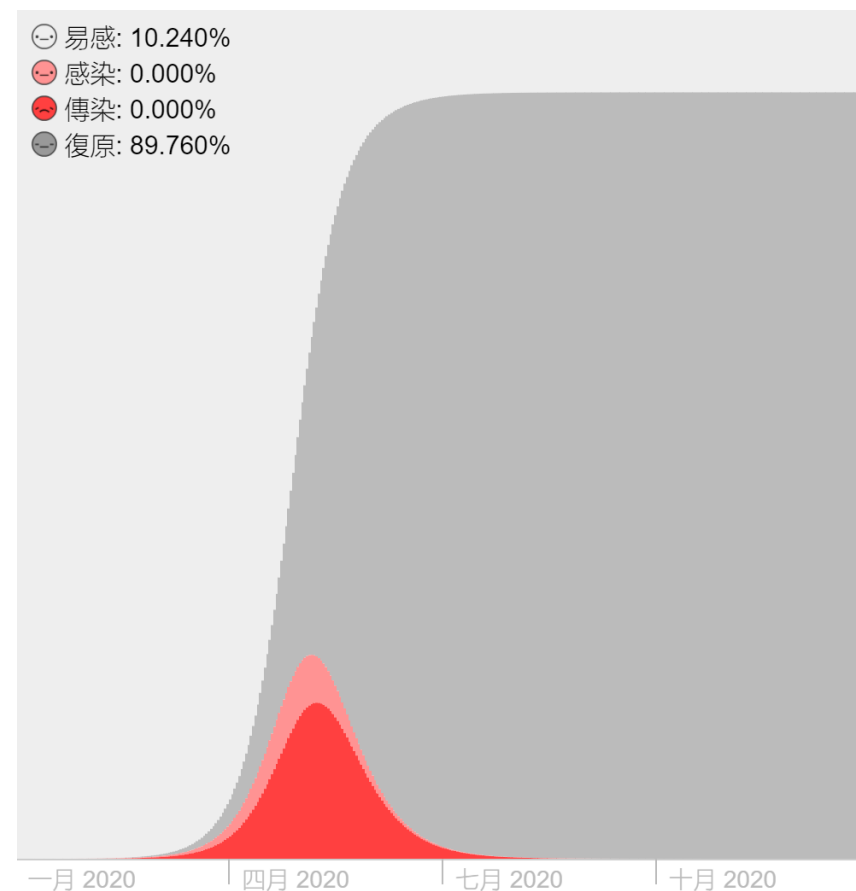
## • 进阶的传染病模型：SIR模型

### • 对于SIR模型的小拓展：SEIR

- 在SIR模型中，一旦个体被传染则立刻可以传染他人
- 然而现实中，还有“潜伏期”的存在，为调控带来很大困难和不确定性
  - 典型案例：新冠的无症状感染者
- SEIR模型，考虑带菌者的情况
  - Exposed，已暴露（带菌）但无力传染



- 进阶的传染病模型：SIR模型
- 对于SIR模型的小拓展：SEIR
  - 在SEIR模型中，多出来一个带菌者（无症状者）转为传染者的概率
  - 就传染趋势而言，SEIR与SIR的区别不大



- **更进一步：SIS模型**
- 令人揪心的新情况：二次感染
  - SIR的基本假设是，一旦康复则终身免疫，不会再成为传染者
  - 然而，现实中很多疾病都存在着二次感染的可能性
  - 因此，我们需要对SIR模型进行修正
  - SIS模型：经过传染期后，节点从 I 阶段并非达到 R 阶段，而是回到 S 阶段

中国新闻网  
WWW.CHINANEWS.COM

首页 → 港澳新闻

字号：大 中 小

## 香港大学证实有康复者二次感染新冠病毒 属全球首例

2020年08月24日 23:07 来源：中国新闻网 [参与互动](#)

(抗击新冠肺炎)香港大学证实有康复者二次感染新冠病毒 属全球首例

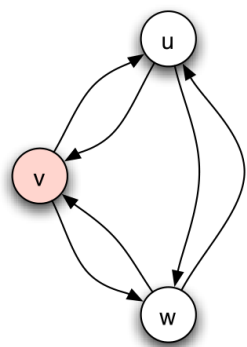
中新社香港8月24日电 一名新冠肺炎康复者自欧洲返回香港后，其新冠病毒检测结果再次呈阳性。香港大学微生物学系团队证实，该患者是第二次感染新冠病毒，属全球首例。

综合无线新闻、香港01等香港媒体24日报道，被证实二次感染新冠病毒的患者为一名33岁男子，他于今年3月底确诊感染新冠病毒，4月中旬康复出院，8月初经英国到西班牙旅行，返回香港后接受检测再度确诊。香港大学微生物学系团队证实，该患者两次感染的病毒株基因排序明显不同。

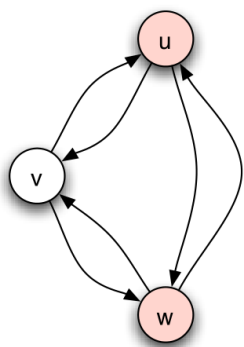
香港大学微生物学系团队表示，对比该患者第一次及第二次感染的病毒株基因排序，有24个不同之处，且该患者返回香港再度确诊后，入院时已检测不出其体内有抗体，因此确定其为康复后再次受到感染，而非“复阳”。这是全球首例康复后二次感染新冠病毒的病例。

## • 更进一步：SIS模型

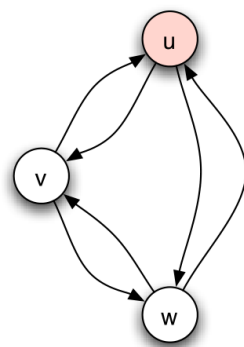
- SIS模型：经过传染期后，节点从 I 阶段并非达到 R 阶段，而是回到 S 阶段
  - SIS模型在停止条件上与SIR的不同之处
    - SIR模型必然会停止（当总感染群体接近全体的时候，群体免疫？）
    - 但对于SIS模型来说，只有某一时刻所有节点都处在S状态才能停止（更加困难）



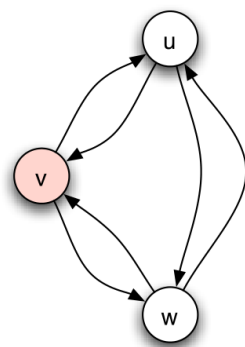
(a)



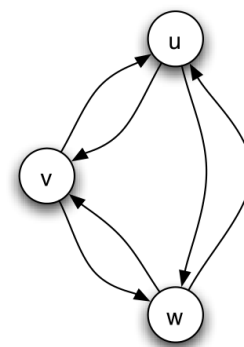
(b)



(c)



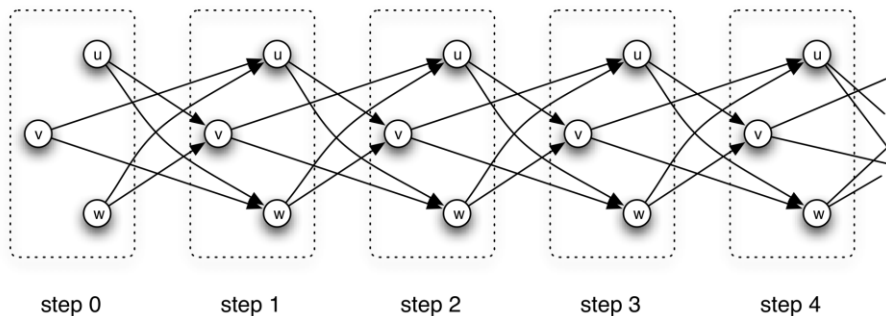
(d)



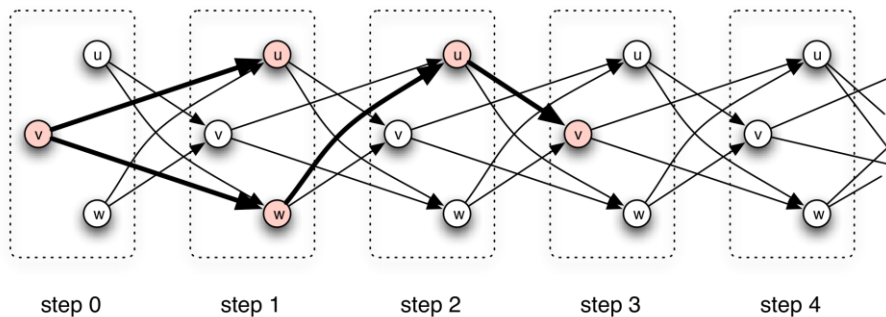
(e)

## • 更进一步：SIS模型

- SIS模型：经过传染期后，节点从 I 阶段并非达到 R 阶段，而是回到 S 阶段
  - 从时间跨度来看，我们可以将SIS近似看做时间扩展网络上的SI



(a) To represent the SIS epidemic using the SIR model, we use a “time-expanded” contact network

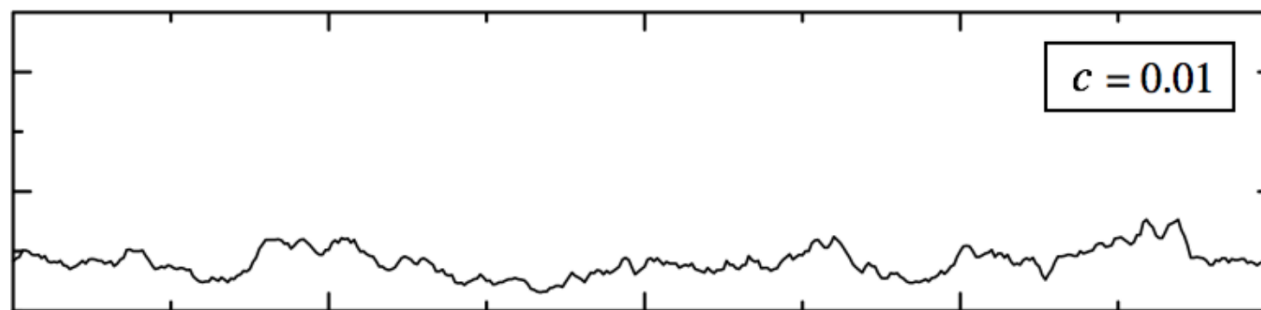


(b) The SIS epidemic can then be represented as an SIR epidemic on this time-expanded network.

- **更进一步：SIS模型**

- SIS模型的类似拓展：从SIS到SIRS

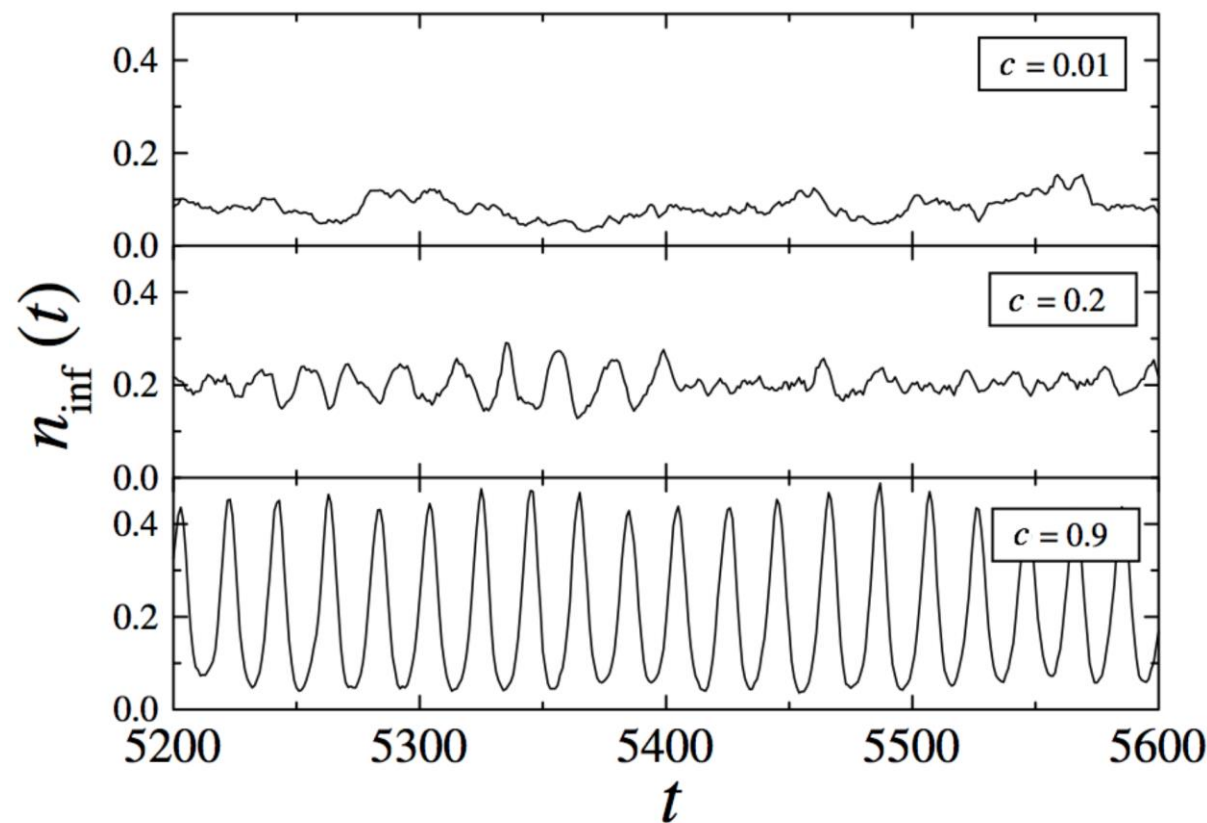
- 允许节点存在一个短暂的免疫期（即R状态）
  - 例如，疫苗可以在一定时间内保护患者，但疫苗可能是有有效期限的
- 在引入R阶段后，疾病可能进入周期振荡
  - 由于暂时免疫，易感群体减少，疫情会从爆发的高峰降至低谷



## • 更进一步：SIS模型

### • SIS模型的类似拓展：从SIS到SIRS

- 此时，我们考虑弱连接的作用
- 弱连接将引入新的传染源，重启传染
- 弱连接的比重越大，振荡可能越激烈
  - 由此体现出传染在一定程度上的“同步性”



- 一些题外话

- 传染病模型的目的，在于借助模型预估疾病蔓延的趋势
  - 同样，一些其他因素，如医院容量、隔离措施等，也会对疾病趋势产生影响
  - 可以自行通过<https://ncase.me/covid-19/> 学习了解更多的知识

# What Happens Next?

COVID-19 Futures, Explained With Playable Simulations

🕒 30 min play/read · by [Marcel Salathé](#) (epidemiologist) & [Nicky Case](#) (art/code)

# 本章小结

## 网络中的信息级联

- 网络节点同质性
- 信息级联现象
  - 节点的“随大流现象”与“沉默的螺旋”
- 基本传播模型
  - 传播的博弈视角
- 传染病模型