

在二部无标度网上的两性疾病传播^{*}

温罗生^{1)†} 杨小帆²⁾ 钟 将²⁾

1) 重庆大学数理学院, 重庆 400044)

2) 重庆大学计算机科学学院, 重庆 400044)

(2007 年 10 月 9 日收到, 2008 年 3 月 7 日收到修改稿)

利用易感-感染-易感(SIS)传播模型研究人类性接触网上的病毒传播. 当仅仅考虑异性性接触时, 该网络是一个二部的无标度网. 对这个网络上的 SIS 传播模型, 通过率方程的方法分析了男性感染率和女性感染率与传染阈值之间的关系, 发现女性感染者与男性感染者之比由网络的拓扑和男女感染率之比所确定. 这一结果表明性接触网的拓扑对性传染病传播的重要性. 最后给出了支持理论结果的数值模拟.

关键词: 性传染病, 两性性接触网, 无标度网络, 二部图

PACC: 0565, 0570J

1. 引 言

在最近几年里, 人们已经逐渐认识到许多物理、生物和社会网络中所呈现复杂网络的性质^[1-3]. 进一步的研究显示许多现实世界中的网络(因特网^[4,5]、万维网^[6]和科学合作网^[7]等)本质上拥有幂律分布的性质, 即

$$P(k) = Ak^{-\gamma}, \quad (1)$$

其中 γ 为标度指数, $P(k)$ 表示一个结点拥有 k 条边的概率. 有这种性质的网络被称为无标度网(scale-free network, 简记为 SF 网). 由于在无限大的 SF 网中度分布的二阶矩 k^2 是发散的, 导致了这种网络具有一些非同寻常的有趣行为. 一个令人吃惊的例子就是当 $2 < \gamma < 3$ 时, 传播阈值的消失从根本上改变了经典传染病模型中得到的结论^[8-11].

另一方面, 性传染病, 特别是人类获得性免疫缺陷综合征(acquired immune deficiency syndrome, 简记为 AIDS), 由于它的高发病率和高死亡率以及由此带来严重的社会经济问题, AIDS 已经引起各国政府、组织、科学家和民众的广泛关注.

人类性接触网是社会网络中带有明确连接的一种网络. Liljeros 等^[2]分析了 1996 年瑞典人性接触的

调查数据并得出男性和女性性伙伴的累计分布具有幂律形式, 对于女性标度指数为 $\gamma_F = 2.54$, 而对于男性为 $\gamma_M = 2.31$. 当然, 对于不同的国家和地区, 该标度指数可以随文化以及社会环境而变化^[12]. 尽管同性性接触在某些国家的性传染病中扮演着重要的角色, 但从全球的角度看, 性传染病最重要的途径还是异性性接触. 在异性性接触中, 由于同性的两个个体不存在性关系, 所以异性性接触网是一个二部图^[13-16]. 同时因为一些男性和女性生理上的差异, 往往男性对女性与女性对男性的传染率并不相等. 例如, 在 AIDS 传播中, 男性对女性的传染率大约是女性对男性的两倍^[17].

本文中, 我们利用易感-感染-易感(SIS)传播模型研究人类性接触网上的病毒传播. 在男性和女性满足相同的结点度分布的假定之下, 我们研究了该模型的非平衡状态转移. 当传染率相等时得到的结论和单部图的 SF 网的结论是一致的. 当女性感染率为男性感染率的 a 倍时, 女性感染密度是男性感染密度的 $a^{\frac{1}{\gamma-1}}$ 倍. 该结果显示女性感染密度和男性感染密度之比不仅与男女的感染率有关, 也与性传播网络的拓扑结构(体现为结点标度指数 γ) 有密切关系. 最后, 利用数值模拟证实了理论结果的正确性.

^{*} 国家自然科学基金(批准号: 10771227) 教育部新世纪优秀人才支持计划(批准号: NCET-05-0759) 教育部博士点基金(批准号: 20050611001) 和重庆市自然科学基金(批准号: 2006BB2231, 2005BB2191)资助的课题.

[†] E-mail: wenluosheng@yahoo.cn

2. 两性传染病传播的 SIS 模型及分析

为研究人类性传染病中网络拓扑和异性关系的效果,我们研究标准的传染病模型.人类异性性接触网是一个二部图,其结点代表男性和女性个体,所有的边代表男性和女性之间的性接触.每个个体只存在两种不同的状态,也就是“易感”或者“已感染”.在每一时间步,每个易感的女性个体,如果和一个已感染的男性个体有性接触,她将以 λ_F 的概率被感染.类似地,男性个体的感染概率是 λ_M .同时,已感染的结点以 δ 的概率被治愈重新成为易感者.只要选择适当的时间间隔,不失一般性,可令 $\delta = 1$.

我们采用率方程的方法研究二部的 SF 网上传染病的状态转移和临界行为.作如下的假设:(1)网络中男性和女性有相同的人口数(2)男性和女性结点度分布满足方程(1)(3) SF 网是度不相关的;(4)一个结点的感染密度仅仅是该结点度的函数.

用 F_k 和 M_k 分别代表具有 k 个异性伙伴的女性和男性的感染密度,建立率方程

$$\begin{aligned} \dot{F}_k &= -F_k + \lambda_F k(1 - F_k)\Theta_M, \\ \dot{M}_k &= -M_k + \lambda_M k(1 - M_k)\Theta_F. \end{aligned} \quad (2)$$

在方程(2)中,右边第一项表示感染结点被治愈的速度,第二项是病毒产生项,考虑了一个具有 k 条边的女性(男性)健康的概率 $1 - F_k(1 - M_k)$,还有通过异性性接触导致感染的概率.通过异性性接触导致感染的概率由下列三个因素决定:感染率 $\lambda_F(\lambda_M)$ 节点度 k 和任意一条边指向感染的男性(感染的女性)结点的概率 $\Theta_M(\Theta_F)$.根据假设(3)和(4),可以得到

$$\begin{aligned} \Theta_F &= \frac{1}{k} \sum_k k F_k P(k), \\ \Theta_M &= \frac{1}{k} \sum_k k M_k P(k), \end{aligned} \quad (3)$$

其中 k 代表结点的平均度.在平衡状态下,也就是 $\dot{F}_k = 0$ 和 $\dot{M}_k = 0$,我们有

$$\begin{aligned} F_k &= \frac{\lambda_F k \Theta_M}{1 + \lambda_F k \Theta_M}, \\ M_k &= \frac{\lambda_M k \Theta_F}{1 + \lambda_M k \Theta_F}. \end{aligned} \quad (4)$$

方程(4)说明下面的事实:结点的连接度 k 越高,结点的感染概率越大;感染率(λ_F 和 λ_M)越大,结点的感染概率越大;异性环境越恶劣(Θ_M 和 Θ_F 越大),

感染的概率越大.

由方程(3)和(4),可得到下列方程:

$$\begin{aligned} \Theta_F &= f(\Theta_M) \stackrel{\text{def}}{=} \frac{1}{k} \sum_k \frac{\lambda_F k^2 P(k) \Theta_M}{1 + \lambda_F \Theta_M k}, \\ \Theta_M &= g(\Theta_F) \stackrel{\text{def}}{=} \frac{1}{k} \sum_k \frac{\lambda_M k^2 P(k) \Theta_F}{1 + \lambda_M \Theta_F k}. \end{aligned} \quad (5)$$

对于性传染病(如 AIDS、淋病、衣原体疾病等),男性对女性的感染率大于女性对男性的感染率,因此我们假定 $\lambda_F = a\lambda_M$,其中 $a \geq 1$.

首先,考虑方程(5)正解存在的条件,以便得到传染病的传播阈值.

可以断言,若

$$\lambda_F \lambda_M \leq \left(\frac{k}{k^2}\right)^2,$$

也就是

$$\lambda_M \leq \frac{k}{\sqrt{a} k^2}$$

时,方程(5)不存在正解;而当

$$\lambda_M > \frac{k}{\sqrt{a} k^2}$$

时,方程(5)有唯一正解.事实上,由于函数 f 和 g 在区间 $[0, 1]$ 上单调递增且连续可微,当然函数 g 的反函数 g^{-1} 存在并且在区间 $[0, g(1)]$ 上也是单调递增且连续可微.记函数 $h = f - g^{-1}$,显然 $h(0) = f(0) - g^{-1}(0) = 0$ 并且 $h(g(1)) < 0$.注意到 $h'' < 0$ 在 $[0, g(1)]$ 总是成立,于是我们知道只要 $h'(0) > 0$ 成立,即当

$$\lambda_F \lambda_M > \left(\frac{k}{k^2}\right)^2$$

时,方程(5)有唯一正解.相反,当

$$\lambda_F \lambda_M \leq \left(\frac{k}{k^2}\right)^2$$

时,方程(5)只有零解,也就是性传染病灭绝.

其次,讨论方程(5)正解的性质.

当 $a = 1$,也就是 $\lambda_F = \lambda_M$,这时函数 f 和 g 是一致的.我们知道当

$$\lambda_M = \lambda_F > \frac{k}{k^2}$$

时,传染病将流行,而当

$$\lambda_M = \lambda_F < \frac{k}{k^2}$$

时,传染病会灭绝.记 (Θ_M^*, Θ_F^*) 为方程(5)的唯一正解,其必然满足 $\Theta_F^* = \Theta_M^*$,并且 Θ_F^* 和 Θ_M^* 是方程 $\Theta = f(\Theta)$ 的唯一正解.特别是当 $\gamma = 3$ 时,有

$$\Theta_F^* = \Theta_M^* = \frac{\exp\left(-\frac{1}{m\lambda}\right)}{m\lambda} \left(1 - \exp\left(-\frac{1}{m\lambda}\right)\right)^{-1}.$$

该结果和单部 SF 网的结论一致^[10].

当 $a > 1$ 时,为说明问题,我们绘出了方程(5)中函数 $\Theta_F = f(\Theta_M)$ 和函数 $\Theta_M = g(\Theta_F)$ 的图像(图1)相应的参数取值为 $m = 1, \lambda_F = 1/2, \lambda_M = 1/4, \gamma = 3$. 两曲线的交点 B 为方程(5)的正解. 根据图1容易得到下列关系:

$$\begin{aligned} & \frac{\exp\left(-\frac{1}{m\lambda_M}\right)}{m\lambda_M} \left(1 - \exp\left(-\frac{1}{m\lambda_M}\right)\right)^{-1} \\ & \leq \Theta_M^* \leq \Theta_F^* \\ & \leq \frac{\exp\left(-\frac{1}{m\lambda_F}\right)}{m\lambda_F} \left(1 - \exp\left(-\frac{1}{m\lambda_F}\right)\right)^{-1}. \end{aligned} \quad (6)$$

不等式(6)给出了方程(5)解分量的关系和上界及下界. 当 $\gamma \neq 3$ 时,解 (Θ_M^*, Θ_F^*) 的关系仍然成立,但上下界难以得到解析表达式^[10].

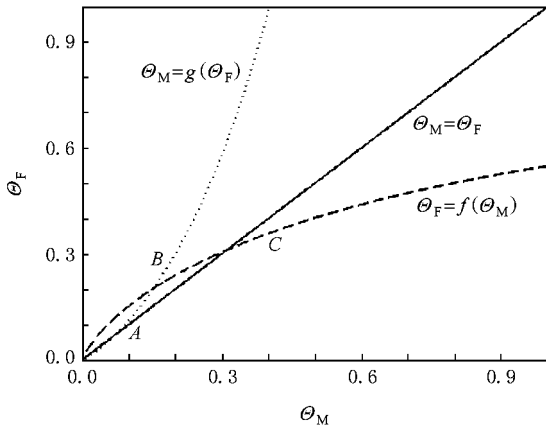


图1 方程(5)正解的存在性以及解的性质示意图 相应的参数取值为 $m = 1, \lambda_F = 1/2, \lambda_M = 1/4, \gamma = 3$. 交点 A 的横纵坐标 $(4e^{-4}(1 - e^{-4}) Ae^{-4}(1 - e^{-4}))$, 交点 B 为方程(5)的解 (Θ_M^*, Θ_F^*) 交点 C 的横纵坐标 $(4e^{-2}(1 - e^{-2}) Ae^{-2}(1 - e^{-2}))$

为了对解 (Θ_F^*, Θ_M^*) 作进一步的了解,我们先讨论 $\gamma = 3$ 时的情况.

利用积分代替级数,可以将方程(5)改写为

$$\begin{aligned} \Theta_F &= \frac{1}{k} \int_m^\infty \frac{\lambda_F k^2 P(k) \Theta_M}{1 + \lambda_F \Theta_M k} dk, \\ \Theta_M &= \frac{1}{k} \int_m^\infty \frac{\lambda_M k^2 P(k) \Theta_F}{1 + \lambda_M \Theta_F k} dk. \end{aligned} \quad (7)$$

将 $P(k)$ 的具体表达式

$$P(k) = 2m^2/k^{-3} \quad (8)$$

代入后可得到

$$\begin{aligned} \Theta_F &= m\lambda_F \Theta_M \ln \frac{1 + m\lambda_F \Theta_M}{m\lambda_F \Theta_M}, \\ \Theta_M &= m\lambda_M \Theta_F \ln \frac{1 + m\lambda_M \Theta_F}{m\lambda_M \Theta_F}. \end{aligned} \quad (9)$$

这里 m 表示结点的最小度.

尽管方程(9)的精确解 (Θ_M^*, Θ_F^*) 难以计算,但我们可以得到

$$\frac{\Theta_F^*}{\Theta_M^*} \approx \sqrt{\frac{\lambda_F}{\lambda_M}} = \sqrt{a}. \quad (10)$$

同时,女性结点和男性结点的感染密度可由下列方程给出:

$$\begin{aligned} \rho_F &= \int_m^\infty P(k) F_k dk, \\ \rho_M &= \int_m^\infty P(k) M_k dk. \end{aligned} \quad (11)$$

将方程(8)代入方程(11),则平衡状态下的感染密度满足

$$\begin{aligned} \rho_F &= 2m^2 \int_m^\infty \frac{\lambda_F \Theta_M^*}{(1 + \lambda_F \Theta_M^* k)^2} dk, \\ \rho_M &= 2m^2 \int_m^\infty \frac{\lambda_M \Theta_F^*}{(1 + \lambda_M \Theta_F^* k)^2} dk. \end{aligned} \quad (12)$$

通过计算得到

$$\begin{aligned} \rho_F &= 2m\lambda_F \Theta_M^* (1 - \Theta_F^*), \\ \rho_M &= 2m\lambda_M \Theta_F^* (1 - \Theta_M^*). \end{aligned} \quad (13)$$

当 $\Theta_M^* \rightarrow 0$ 当然也有 $\Theta_F^* \rightarrow 0$, 我们有

$$\frac{\rho_F}{\rho_M} \approx \frac{\lambda_F \Theta_M^*}{\lambda_M \Theta_F^*} \approx \sqrt{\frac{\lambda_F}{\lambda_M}} = \sqrt{a}. \quad (14)$$

上述结果表明,当女性感染率为男性感染率的 a 倍时,在平衡状态下女性感染密度为男性感染密度的 \sqrt{a} 倍.

下面再分析当 $2 < \gamma < 3$ 的情况. 此时结点的度分布

$$P(k) = (\gamma - 1)m^{\gamma-1} k^{-\gamma}. \quad (15)$$

通过计算得到

$$k = \int_m^\infty k P(k) dk = (\gamma - 1)m(\gamma - 2). \quad (16)$$

将方程(15)和(16)代入方程(5)得

$$\begin{aligned} \Theta_F &= (\gamma - 2)m^{\gamma-2} \sum_k \frac{\lambda_F \Theta_M}{(1 + \lambda_F \Theta_M k)^{\gamma-2}}, \\ \Theta_M &= (\gamma - 2)m^{\gamma-2} \sum_k \frac{\lambda_M \Theta_F}{(1 + \lambda_M \Theta_F k)^{\gamma-2}}. \end{aligned} \quad (17)$$

(17)式也可记为

$$\begin{aligned} \Theta_F &= K(1, \gamma - 2, \gamma - 1, -(m\lambda_F \Theta_M)^{-1}), \\ \Theta_M &= K(1, \gamma - 2, \gamma - 1, -(m\lambda_M \Theta_F)^{-1}), \end{aligned} \quad (18)$$

其中 F 为 Gauss 超几何函数. 为求解方程 (18), 考虑到当 $z \rightarrow 0$ 时 Gauss 超几何函数可近似表示为^[10]

$$\mathbb{K}(1, \gamma - 2, \gamma - 1, -z^{-1}) \approx \frac{(\gamma - 2)\pi}{\sin(\gamma - 2)\pi} z^{\gamma-2}. \tag{19}$$

根据方程 (19), 可以知道方程 (18) 的解 (Θ_M^*, Θ_F^*) 满足关系式

$$\begin{aligned} \Theta_F^* &\approx \frac{(\gamma - 2)\pi}{\sin(\gamma - 2)\pi} (m\lambda_F \Theta_M^*)^{\gamma-2}, \\ \Theta_M^* &\approx \frac{(\gamma - 2)\pi}{\sin(\gamma - 2)\pi} (m\lambda_M \Theta_F^*)^{\gamma-2}. \end{aligned} \tag{20}$$

根据方程 (20) 容易得到

$$\frac{\Theta_F^*}{\Theta_M^*} = \left(\frac{\lambda_F}{\lambda_M} \right)^{\frac{\gamma-2}{\gamma-1}}. \tag{21}$$

将 $P(k)$ 的表达式 (15) 代入方程 (11), 则平衡状态下的感染密度满足

$$\begin{aligned} \rho_F &= \mathbb{K}(1, \gamma - 1, \gamma, -(m\lambda_F \Theta_M^*)^{-1}), \\ \rho_M &= \mathbb{K}(1, \gamma - 1, \gamma, -(m\lambda_M \Theta_F^*)^{-1}). \end{aligned} \tag{22}$$

由 Gauss 超几何函数的定义, 可以推导关系

$$\begin{aligned} &\mathbb{K}(1, \gamma - 1, \gamma, -(m\lambda_F \Theta_M^*)^{-1}) \\ &= k \lambda_F \Theta_M^* (1 - \mathbb{K}(1, \gamma - 2, \gamma - 1, \\ &\quad -(m\lambda_F \Theta_M^*)^{-1})), \\ &\mathbb{K}(1, \gamma - 1, \gamma, -(m\lambda_M \Theta_F^*)^{-1}) \\ &= k \lambda_M \Theta_F^* (1 - \mathbb{K}(1, \gamma - 2, \gamma - 1, \\ &\quad -(m\lambda_M \Theta_F^*)^{-1})). \end{aligned} \tag{23}$$

结合方程 (18) (22) 和 (23), 于是有

$$\begin{aligned} \rho_F &= k \lambda_F \Theta_M^* (1 - \Theta_F^*), \\ \rho_M &= k \lambda_M \Theta_F^* (1 - \Theta_M^*). \end{aligned} \tag{24}$$

注意到方程 (21), 当 $\Theta_F^* \rightarrow 0$ 和 $\Theta_M^* \rightarrow 0$ 时,

$$\frac{\rho_F}{\rho_M} \approx \frac{\lambda_F \Theta_M^*}{\lambda_M \Theta_F^*} \approx \left(\frac{\lambda_F}{\lambda_M} \right)^{\frac{1}{\gamma-1}} = a^{\frac{1}{\gamma-1}}. \tag{25}$$

比较方程 (14) 和 (25) 可以看出, 当 $\gamma = 3$ 时, 结果也符合方程 (25). 所以我们得到以下结果: 当 $2 < \gamma \leq 3$ 时, 平衡状态下男女感染密度之比满足

$$\frac{\rho_F}{\rho_M} \approx a^{\frac{1}{\gamma-1}}. \tag{26}$$

3. 数值模拟结果

为了验证理论结果的正确性, 我们对本文所提出的模型进行了数值模拟. 先说明二部 SF 网的产生

过程. 在女性 (F 类) 和男性 (M 类) 中分别产生 m_0 个结点. 每一次先在 F 中加入一个新结点 F_{i+1} , 同时产生 m 条边并以概率 $k_j / \sum_p k_p$ 指向 M 类中的第 j 个结点, 其中 k_j 表示 M 类中的第 j 个结点的度. 随后在 M 中加入一个新结点 M_{i+1} , 用同样的规则向 F 类中连边. 采用这种规则进行足够多的次数之后, 得到一个 $\gamma = 3$ 的 SF 图, 网络的平均度 $k = 2m$. 数值模拟中采用 $m = 1, 2, 3, m_0 = 10$, 网络的规模取 $N = 10^5$. 先随机选择男性和女性中 5% 的结点为感染结点. 对标度指数满足 $2 < \gamma < 3$ 的二部图, 我们采用文献 [12] 提供的方法, 将其中的男性和女性的魅力指数均取为零.

图 2 反映了网络拓扑给定时女性感染密度与男性感染密度之比和 a (女性感染率与男性感染率之比) 之间的关系, 在 a 取不同值时得到了女性感染密度与男性感染密度之比. 数据通过如下的方法得到: 对 20 种不同的网络按照 $\lambda_M = 1/50$ 和 $\lambda_F = a\lambda_M$ 进行超过 50 次的模拟, 并对得到的上述密度比取平均值. 从图 2 可以看出, 模拟结果与理论结果之间尽管存在一定的误差, 但足以说明理论结果的正确性. 误差的原因可能和以下因素有关: 网络规模、模拟的次数以及 λ_M 的值 (理论值要求足够小).

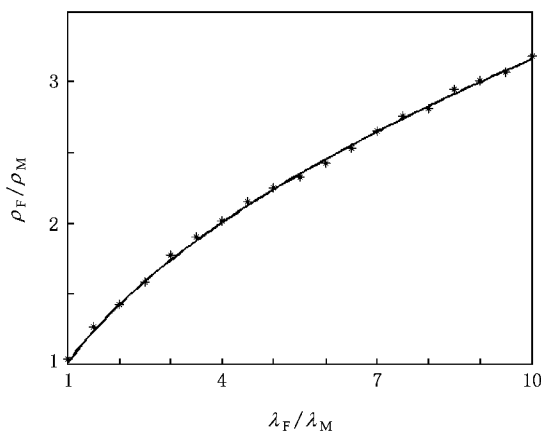


图 2 女性感染密度与男性感染密度之比和女性感染率与男性感染率之比的关系. 数据点为模拟结果, 实线为理论结果

图 3 给出了女性感染密度与男性感染密度之比和网络标度指数的关系. 取 $a = 2$, 在不同的标度指数下, 对得到的网络进行模拟. 为了提高精度, 对较小的 γ 我们取更小的传染率 λ_M .

模拟中我们还发现, 在网络拓扑给定时, 女性感染密度与男性感染密度之比是一个非常稳定的

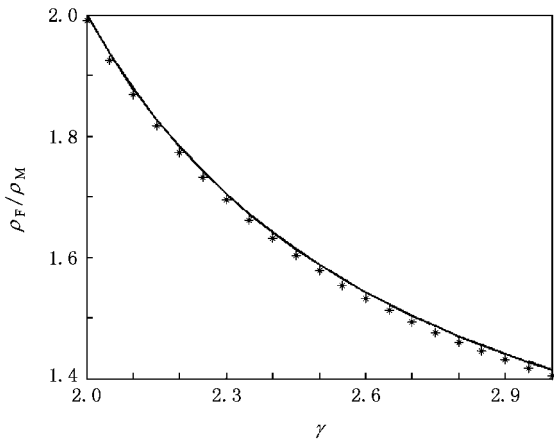


图3 女性感染密度与男性感染密度之比和网络标度指数的关系
参数 $a = 2$, 数据点为模拟结果, 实线为理论结果

量, 即使在较小次数的病毒传播过程中也有这样的性质. 因此, 对于异性传播疾病, 女性感染密度与男性感染密度之比可以作为衡量传染状况的基本指标.

4. 结 论

研究了在二部的 SF 网上的病毒传播. 模型中男性结点和女性结点有不同的传染率. 本文的模型着眼于在不同传播效率情况下传播阈值以及平衡状态下男女结点被感染的比例. 结果显示感染率较大的女性结点更加容易受到传染病的伤害, 但因为传染是男女双方共同的结果, 当女性感染率为男性的 a 倍时, 女性感染密度仅仅是男性感染密度的 $a^{\frac{1}{\gamma-1}}$ 倍. 对 AIDS, 女性与男性的感染率之比大约为 2:1, 因此女性感染密度与男性感染密度之比大致为 $2^{\frac{1}{\gamma-1}}$.

对于 γ 的取值, 根据一些国家的调查数据和分析结果, 性观念比较开放的国家(如美国、英国等欧美国家), γ 的取值相对较小; 而对一些性观念比较传统的国家(如中国、日本等亚洲国家), γ 的取值相对较大. 可以看出, 性观念越开放, 女性将在病毒传播过程中受到更大的伤害.

- [1] Albert R, Barabási A L 2002 *Rev. Mod. Phys.* **74** 47
- [2] Liljeros F, Edling C R, Amaral L A, Stanley H E, Åberg Y 2001 *Nature* **411** 907
- [3] Strogatz S H 2001 *Nature* **410** 268
- [4] Vázquez A, Pastor-Satorras R, Vespignani A 2002 *Phys. Rev. E* **65** 066130
- [5] Faloutsos M, Faloutsos P, Faloutsos C 1999 *Comput. Commun. Rev.* **29** 251
- [6] Barabási A L, Albert R 1999 *Science* **286** 509
- [7] Newman M E J 2001 *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **98** 404
- [8] Pastor-Satorras R, Vespignani A 2001 *Phys. Rev. Lett.* **86** 3200
- [9] Pastor-Satorras R, Vespignani A 2001 *Phys. Rev. E* **63** 066117
- [10] Boguñá M, Pastor-Satorras R, Vespignani A 2003 *Phys. Rev. Lett.* **90** 028701
- [11] Xu D, Li X, Wang X F 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 1313 (in Chinese)[许丹、李翔、汪小帆 2007 物理学报 **56** 1313]
- [12] Schneeberger A, Mercer C, Gregson S, Ferguson N, Nyamukapa C, Anderson R, Johnson A, Garnett G 2004 *Sex. Trans. Dis.* **31** 380
- [13] Ergün G 2002 *Physica A* **308** 483
- [14] Doherty I A, Padian N S, Marlow C, Aral S O 2005 *J. Infect Dis.* **191** 42
- [15] Lind P G, González M C, Herrmann H J 2005 *Phys. Rev. E* **72** 056127
- [16] Holme P, Liljeros F, Edling C R, Kim B J 2003 *Phys. Rev. E* **68** 056107
- [17] Mastro T M, de Vincenzi I 1996 *AIDS* **10** 75

Two-sex epidemic spreading on bipartite scale-free networks^{*}

Wen Luo-Sheng^{1)†} Yang Xiao-Fan²⁾ Zhong Jiang²⁾

¹⁾ *School of Mathematics and Physics, Chongqing University, Chongqing 400044, China*

²⁾ *School of Computer Science, Chongqing University, Chongqing 400044, China*

(Received 9 October 2007 ; revised manuscript received 7 March 2008)

Abstract

Applying the SIS (susceptible-infected-susceptible) model, we study the epidemic spreading on the web of human sexual contacts. When only heterosexual contacts are considered, the web is a bipartite scale-free network. By using the rate equation approach, we analyze the relation between epidemic threshold and infection rates of female-to-male and male-to-female. We find that the ratio of infected female density to infected male density is determined by the topology of the network and the proportion between infection rates of females and males. This demonstrates the importance of the topology of network. Finally, we present numerical simulation results that support the analytic results.

Keywords : sexually transmitted diseases, two-sex sexually contacts networks, scale-free networks, bipartite graph

PACC : 0565, 0570J

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10771227), the Program for the New Century Excellent Talents of Ministry of Education, China (Grant No. NCET-05-0759), the Doctoral Foundation of Ministry of Education, China (Grant No. 20050611001) and the Natural Science Foundation of Chongqing, China (Grant Nos. 2006BB2231, 2005BB2191).

[†] E-mail : wenluosheng@yahoo.cn