

基于 Agent 动态加权二部无标度网络的异性 HIV 传播与政策调控模型

何晓力¹ 毕贵红² 王海瑞¹

(昆明理工大学信息工程与自动化学院 昆明 650500)¹ (昆明理工大学电力工程学院 昆明 650500)²

摘要 HIV的传播是个体的行为、疾病的干预措施和个体之间的社会网络协同演化的结果。提出了基于 agent 的动态加权二部无标度网络方法的异性 HIV 传播和干预仿真模型。二部网络中的女性人群根据高危行为不同分为普通人群和女性性工作者(Female Sex Workers,FSW),男性人群根据高危行为不同分为普通人群和女性性工作者客户(Clients of female sex worker,CSW)。给出了利用配置模型快速生成指数可调的异性二部无标度网络的生成算法,其根据异性二部网络中单位时间内性行为次数的分配算法确定二部网络中边的权值,构成二部加权无标度网络。网络中的伙伴关系有固定关系、偶然关系型和临时关系,二部网络中的边可随边的维持时间的结束而断开和重连,网络具有动态特性。个体/agent 模型描述了个体高危行为、病程、个体社会结构与干预措施之间的相互影响关系。仿真实验分析了个体高危行为是否采用安全措施、是否参加自愿咨询检测和是否参加抗病毒治疗等干预措施对疾病传播的影响。

关键词 Agent,二部图无标度网络,干预措施,HIV

中图分类号 TP391.9 文献标识码 A

Evaluating Heterosexual HIV Transmission and Interventions Based on Agent Bipartite Dynamic Weighting Scale-free Network

HE Xiao-li¹ BI Gui-hong² WANG Hai-rui¹

(Faculty of Information Engineering and Automation, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)¹

(Faculty of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)²

Abstract The spread of HIV is the result of coevolution of individual behaviors, intervention measures and social networks. This paper presented a method based on bipartite dynamic weighting scale-free agent network for investigating HIV heterosexual transmission and the effectiveness of HIV prevention interventions. According to different high-risk behavior, the female is divided into the general population and female sex workers (FSW), and the male is divided into the general population and clients of female sex worker (CSW) in the bipartite network. A bipartite scale-free network configuration generation algorithm was constructed for describing the relationships of heterosexual contacts. A new weighting algorithm was developed to construct weighting network by adding sex act explicitly on heterosexual contact network. The dynamics of heterosexual network is supported through heterosexual network stable, casual and temporary partnership dissolution and formation. In the model, agent represents males and females who interact each other within risk networks engaging in sexual behavior over time. Agent describes individual high-risk behavior, course of HIV disease and social structure. Agent also defines the behavior rules for adaption to the HIV prevention interventions. Exploratory simulation results are consistent with empirical studies, which demonstrate the effectiveness of a combination of interventions, including voluntary counseling and HIV test, condom promotion for safe sexual behavior and initiating antiretroviral treatment.

Keywords Agent, Bipartite scale-free network, Intervention, HIV

1 引言

艾滋病(AIDS)是因为人们感染人类免疫缺陷病毒(HIV)引起的免疫缺陷综合征,个体的行为和个体之间的社会网络是影响 HIV 传播的关键因素,疾病的干预和控制措施

通过对个体和个体之间关系的改变来影响 HIV 的传播。

HIV 传播系统是个体、社会网络和干预政策协同演化的复杂系统,基于 agent 或元胞自动机(Cellular Automata, CA)微观仿真建模方法和复杂网络理论是研究复杂系统的主要方法。近年来,HIV 传播动力学研究者注意到微观建模方法,

到稿日期:2013-04-30 返修日期:2013-07-15 本文受国家自然科学基金项目(61064010),云南省自然科学基金项目(2009CD028),昆明理工大学科学研究基金项目(201001)资助。

何晓力(1988-),男,硕士生,主要研究方向为复杂网络建模,E-mail:xlhecs@163.com;毕贵红(1968-),男,博士,教授,主要研究方向为社会与经济系统仿真,E-mail:km_bgh@163.com(通信作者);王海瑞(1969-),男,博士,教授,主要研究方向为智能控制。

将其用来构建性途径 HIV 传播模型^[1-3]。模型中微观个体封装了个体的属性和行为,强调了基于微观建模方法在考虑生物、社会和复杂环境因素方面的优势。但是这些模型中 agent 和 CA 之间的联系主要考虑为随机网络和规则网络,与实际的性接触网络有较大差异,还需要对个体之间的社会网络对传播的影响进行深入研究。研究表明,HIV 传播的性接触网络是复杂的动态社会网络,其特征有:(1)人均接触伙伴关系数较低,但是接触关系数的分布有很大差异,所以性接触网络中大部分人只有少数伙伴数,而少部分人却有大量的伙伴数,HIV 传播中的性接触网络具有无标度网络特征^[4-6]。(2)性接触网络中的网络节点因出生或者死亡会加入或退出网络,网络中的伙伴关系根据维持时间的长短随时间演化而断开和重连,所以性接触网络是动态网络^[7-10]。这些研究结果表明利用复杂网络模型来研究 HIV 的必要性和正确性,但也有明显不足:由于网络的结点演化规则过于简单,不足以将对 HIV 传播有重要影响的个体的属性和行为规则、个体之间的动态接触网络和个体对治疗及防控措施响应等因素考虑在内。

疾病的干预政策通过对个体行为、病程和个体之间关系的改变来控制 HIV 的传播。通过宣传教育可以提高人群使用安全套的比例,自愿 HIV 检测结果让人们了解自己 HIV 的感染状况,进而促进高危行为的改变,提高安全套的使用率^[11]。接受抗病毒治疗的个体其 CD₄ 细胞水平有所下降,HIV 感染概率随之下降,从而减小 HIV 传播的风险,短时间内可减少艾滋病新发个体^[12]。Reuben M Granich 提出一种“检测并立即治疗”的数学模型,认为如果所有人都自愿进行检测,当检测发现感染 HIV 后立刻开始治疗,则 AIDS 将会被消灭^[13]。

异性性接触网络中男性和女性结点的度分布都服从幂率分布的二部无标度网络。Güler Ergün^[14]将 BA 无标度网络中的生长和优先连接机制推广到二部网络中,建立一个男性和女性幂率分布指数可调的二部无标度网络演化模型。温罗生^[15]在异性网络中利用数学建模的方法基于二部无标度网络对病毒传播进行研究,分别对相同幂律分布和指数可调幂律分布构建的异性网络进行研究,但网络没有考虑连接的动态性、边的权重、疾病传播的干预政策和措施。另外,以上这些模型中的性接触网络都是无权网络,即假设性接触网络上所有的边的传染风险是一样的,也即假设在单位时间内网络上的个体与每个伙伴拥有相同的性行为次数,所以个体单位时间内的性行为次数与其伙伴数量成正比,这既不现实,也与经验数据不符^[16]。加权无标度网络可以描述网络中每条边传播 HIV 风险的水平,加权网络中用边的权重来表示两个节点间实际发生的性接触次数,两个节点间的实际发生性接触次数与每个个体在其伙伴间分配性行为的次数方式有关。研究性接触网络 HIV 传播需要考虑网络中有边连接的两个节点之间实际发生的性接触次数和传播疾病的风险是有差别的,而且是随时间变化的,所以,利用动态加权无标度网络来描述性接触 HIV 传播网络是合适的选择。因此利用动态加权二部无标度网络来描述异性性接触 HIV 传播网络,并结合网络的特性和干预措施来研究 HIV 的传播更加合适。

因此,研究 HIV 在复杂社会网络系统的传播有必要将微观仿真方法和复杂网络方法这两者结合起来,而且由于基于

agent 微观建模方法容易将个体之间的动态社会网络管理功能嵌入在 agent 模型中,因此复杂 agent 网络建模方法成为复杂社会系统仿真研究的必然选择。梅珊^[4]等结合复杂网络和 agent 建模方法研究了阿姆斯特丹地区的男男 HIV 传播问题。Nigel Gilbert 等利用 agent 建模技术来研究社会复杂动态网络的生成模型^[17]。这些研究提示将微观仿真方法与复杂网络模型结合起来研究复杂系统及 HIV 传播与控制问题是新的研究方向。基于上述考虑,本文利用基于 agent 的动态加权二部无标度网络来构建更为实际的异性 HIV 传播与控制模型,具体特点如下:(1)将 agent 微观仿真方法与复杂网络模型结合起来研究 HIV 传播。(2)快速生成指数可调的动态加权二部无标度异性性传播网络。(3)模型中考虑个体高危行为是否采用安全措施(安全套使用率)、是否参加自愿咨询检测(Voluntary Counseling and Testing, VCT)(检测率)和是否参加抗病毒治疗(Anti-Retroviral Therapy, ART)(治疗率)等干预措施对疾病传播的影响。(4)将人群分为高危人群和普通人群,模型可以验证高危人群在 HIV 传播过程中的主导地位。

2 动态加权二部图无标度网络模型

2.1 模型概述

现实世界中许多结构可以用二部图进行描述,异性性接触网络就是典型的二部图结构。在网络中,节点的度是节点连接的邻居节点的数目。二部图包括一个三元组 $G=(\Delta, \nabla, E)$,其中 Δ 和 ∇ 表示两个不相交的节点集,分别为上节点集和下节点集。 $E=\Delta \times \nabla$ 代表边集合。与经典图的不同之处在于边只存在于上节点和下节点之间。两个度分布可以自然地关联成这样一个图,即上节点度分布: $\Delta_k = \frac{|\{t \in \Delta; d(t)=k\}|}{|\Delta|}$

和下节点度分布: $\nabla_k = \frac{|\{t \in \nabla; d(t)=k\}|}{|\nabla|}$ 。这两个分布在网络生成中发挥核心作用。用二部图描述异性性接触网络,用上节点表示女性节点,用下节点表示男性节点,上下节点之间的连接边表示性接触伙伴关系,上下节点的伙伴数量(即度分布)满足无标度网络的度分布,说明生长性质和优先连接机制仍是异性二部网络生成的根本原因。人们意识到男性群体和女性群体的高危行为具有显著差异,特别是女性工作者的存在和男性人群中嫖娼人员的存在是 HIV 传播的重要因素,更加精确的模型是将女性群体和男性群体都分成高危人群和普通人群两类,所以将人群分组有利于考虑高危行为人群对疾病传播的影响。将女性节点人群分为 FSW 和普通人群,将男性人群分为 CSW 和普通人群,其中 FSW 为女性网络中度大的节点。根据网络中连接关系的维持时间,将维持时间较长的连接关系称为固定连接,将维持时间较短的连接关系称为偶然连接,将 FSW 和 CSW 之间的连接关系称为临时连接,并确定连接的维持时间。当连接关系维持时间超过了给定的时间,则连接关系断开,同时也会为可以建立连接关系的点建立连接,实现网络的动态性。在网络中,根据个体间性接触次数确立网络中边的权值,先为每个个体分配一个潜在的性接触次数,次数与节点代表的人群类型、节点的度以及边的维持时间有关。节点类型为 FSW 的潜在性接触次数最多,网络中度大的节点潜在的性接触次数也会相对较多。将节点潜在在次数按照连接的类型以及连接的维持时间分配给与之相连

的邻居节点,得到实际性接触次数,并将它保存为网络边的权值。网络演化过程如图1所示。

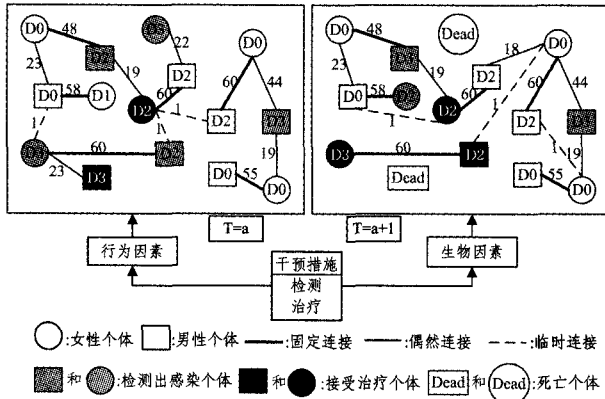


图1 异性接触网络演化及 HIV 传播原理

在图1中,网络从 a 时刻到 $a+1$ 时刻演化,节点/个体的状态为 $D=\{D_0, D_1, D_2, D_3\}$, D_0 表示未感染时期, D_1 表示感染初期, D_2 表示无症状期, D_3 表示 AIDS 时期,图中边上的数字代表单位时间内个体间发生性行为的次数,即网络的权值。当网络中有个体感染 HIV 后,网络上未感染个体与之发生性接触有可能被感染 HIV,由此 HIV 可能在网络中传播开来。从图中可以看出,在加权无标度网络中,有边的断开和重连,有 HIV 病程的发展以及个体的死亡。干预措施影响 HIV 传播主要有行为因素和生物因素,即检测和治疗。所以,个体行为、病程、性传播网络和干预政策相互影响,协同演化。异性性接触网络用二部图表示为四元组 $G=(F, M, E, W)$,其中 $F=\{F_1, F_2, \dots, F_{N_f}\}$ 表示二部图 G 中的上节点, $M=\{M_1, M_2, \dots, M_{N_m}\}$ 表示二部图 G 中的下节点, $E=\{E_1, E_2, \dots, E_k\}$ 表示二部图 G 中的边, $W=\{W_1, W_2, \dots, W_k\}$ 表示二部图 G 中的边对应的权值, K 为总边数,得到如图2所示的异性网络二部图。图中 M_i 代表男性, F_i 代表女性,网络图中圆形代表男性,三角形代表女性,红色连接代表固定连接,灰色连接代表偶然连接,蓝色连接代表临时连接,度大的节点其图形较大。

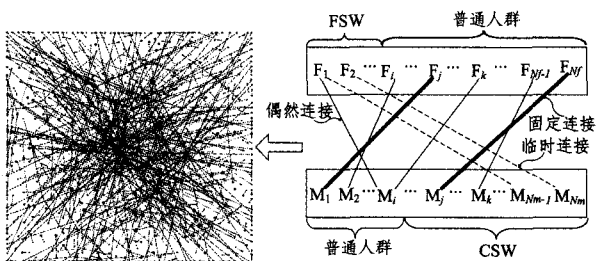


图2 异性网络二部图原理

2.2 二部图无标度网络配置模型生成算法

最早的配置模型是由 Bender 和 Canfield^[18]提出的。配置模型根据给定的度序列生成网络,它是一种扩展的随机网络生成模型并且应用范围非常广。度序列是指 N 个整数的任意序列,表示为 $D=\{k_1, k_2, \dots, k_N\}$,其中 N 表示网络节点总数, k_i 表示第 i 个节点的度。文献[4]利用配置模型生成同性无标度网络模型来研究男男同性 HIV 传播,证明配置模型可以克服 BA 优先连接生长模型的以下缺点:(1)网络生成用时长;(2)每次新生成网络无法保留之前的伙伴关系信息;(3)幂律分布指数不可调。文献[14,15]研究了二部无标度网络优先连接生长模型,但其二部无标度网络的优先连接生长模

型存在与 BA 模型一样的缺点。本文在此基础上给出了异性二部图无标度网络的动态网络配置模型生成算法。主要原理如下:

(1)生成上下节点集 F 和 M ,并将每个节点 F_i 和 M_j 分别分配一个节点度 k_i^f 和 k_j^m ,异性 HIV 性传播网络是无向图,网络的度分布 p_k 是指随机选取一个节点度为 k 的概率。异性网络中男性和女性网络都服从无标度网络,度分布都服从幂律分布,幂律分布形式如式(1)所示,其中男性: $2.3 \leq \lambda_m \leq 2.7$,女性: $2.7 \leq \lambda_f \leq 3.2$,一般情况下 $\lambda_f > \lambda_m$ 。

$$p_k = \begin{cases} Ck^{-\lambda}, & k \in [1, k_{\max}] \\ p_0, & k = 0 \end{cases} \quad (1)$$

(2)为每个节点 F_i 和 M_j 创建与其度相等的连接桩 k_i^f 和 k_j^m 。

(3)在上下连接桩间随机连接生成一条边,生成边的可能性与其度的大小成正比。生成边时,满足如下条件:两个节点桩之间不存在边,且交互形成局部判定条件。网络生成的男性和女性节点总度数要满足平衡条件。

二部图无标度网络配置模型生成算法的具体实现方法如下:

(1)建立 N 个节点的网络,分别给定男性和女性网络中的最大度 k_{\max}^m 和 k_{\max}^f , λ_m 和 λ_f 以及 p_0^m 和 p_0^f 。

(2)根据 $\sum_k p_k = 1$,得到 $C(\sum_{k=1}^{k_{\max}} k^{-\lambda}) = 1 - p_0$,分别计算男性和女性无标度网络中的系数 C ,记为 C_m 和 C_f 。

(3)根据式(1)分别求出男性和女性无标度网络的度分布 p_k^m 和 p_k^f 。网络中的每个节点只能与异性节点相连,因此男性节点和女性节点度之和相同,其度之和为网络的总边数。又因为节点度服从幂律分布,所以可以得出网络中男性节点度之和 D_m 与女性节点度之和 D_f 分别为(其中 N_m 和 N_f 分别为男性和女性的总人数):

$$D_m = N_m \sum_{k=1}^{k_{\max}^m} k p_k^m \quad (2)$$

$$D_f = N_f \sum_{k=1}^{k_{\max}^f} k p_k^f \quad (3)$$

(4)根据 $D_m = D_f$,并利用式(1)将 p_k^m 和 p_k^f 代入,得到网络中男性和女性人数比如式(4)所示。

$$\frac{N_m}{N_f} = \frac{C_f \sum_{k=1}^{k_{\max}^f} k^{1-\lambda_f}}{C_m \sum_{k=1}^{k_{\max}^m} k^{1-\lambda_m}} \quad (4)$$

(5)将 C_m 和 C_f 代入式(4),分别算出网络中男性人数 N_m 和女性人数 N_f ,从而分别得到男性和女性网络中度为 k 的节点个数 $N_k^m = N_m \times p_k^m$ 和 $N_k^f = N_f \times p_k^f$ 。根据 FSW 在女性总人数所占的比例计算其人数,然后利用 FSW/CSW = 1/10,计算 CSW 的人数,最后分别给相应的节点标记相应的类型。根据网络中的每个节点分配的度,得到男性和女性节点度序列为 $Degree_m = \{k_1, k_2, \dots, k_{N_m}\}$ 和 $Degree_f = \{k_1, k_2, \dots, k_{N_f}\}$,将其转成两个由节点组成的数组 $Array_m$ 和 $Array_f$,并且每个节点出现 k_i 次,得到数组如式(5)所示。

$$Array_m = \underbrace{\{M_1, \dots, M_1\}}_{k_1^m}, \underbrace{\{M_2, \dots, M_2\}}_{k_2^m}, \dots, \underbrace{\{M_j, \dots, M_j\}}_{k_j^m}, \dots, \underbrace{\{M_{N_m}, \dots, M_{N_m}\}}_{k_{N_m}^m}$$

$$Array_f = \underbrace{\{F_1, \dots, F_1, F_2, \dots, F_2, \dots, F_i, \dots, F_i, \dots, F_{N_f}, \dots, F_{N_f}\}}_{k_f^1} \underbrace{\quad \quad \quad}_{k_f^2} \underbrace{\quad \quad \quad}_{k_f^3} \quad (5)$$

(6)每次从 $Array_f$ 中选取点 F_i , 如果 F_i 的类型为 FSW, 因为 FSW 的伙伴大部分为临时 CSW, 则以 90% 的概率在 $Array_m$ 中选取节点类型为 CSW 的点 M_j ; 如果 F_i 的类型为普通人群, 则随机在 $Array_m$ 中选取一个点 M_j , 当 F_i 和 M_j 之间不存在边时, 则建立一条新边 $E_{i,j}$, 并给边赋予相应的权值和属性。

(7)重复步骤(6), 直到数组中的元素不能再生成边为止。在实际生成过程中, 网络中最多生成 D_m 条边, 一般不能达到理论最大边数, 当网络中生成的边总数小于 $0.97D_m$ 时, 则网络中剩余节点过多, 认为网络生成失败, 需要重新生成网络。

2.3 网络动态演化

男性群体中的高危人群(CSW)和普通人群通过和女性中的高危人群(FSW)和普通人群的性接触导致病毒在人群中传播。不同人群间的性接触关系存在 3 种类型: 固定连接、偶然连接和临时连接。临时连接只存在于 CSW 人群和 FSW 人群之间, 为一次性关系; 固定连接表示长期伙伴关系, 一般维持时间为一年至数十年; 偶然连接表示较短的伙伴关系, 一般维持时间为几个月至一年多。除了 CSW 和 FSW 规定为临时关系外, 其他人群之前的关系既可以是固定连接, 也可以是偶然连接, 但每个节点最多只能存在一条固定连接。HIV 传播社会关系网络具有动态性, 当连接超过维持的时间, 边的连接关系随时间演化就会发生断开和重连。生成的网络中连接关系的边会随着旧伙伴关系持续时间的结束而断开, 同时也会有新的伙伴关系产生。为了在模型中描述节点与边的关系, 个体可用下列伙伴关系状态来描述其参与社会网络的状态(如图 3 所示): 可变状态、偶然连接、固定连接、临时连接和中间状态。伙伴关系的状态依赖于个体的社会行为和共时伙伴特征。

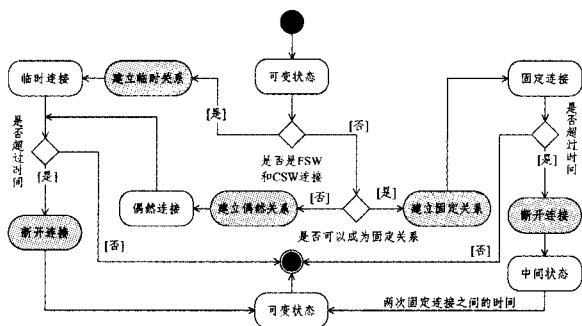


图 3 社会关系状态转换图

在网络生成的过程中, 当两个节点之间尚未建立关系, 属于可变状态, 此时可通过判断是否是 FSW 和 CSW 之间的连接来决定当前状态是否转换成临时连接, 如果不是, 则判断当前节点是否可以成为固定连接来决定当前边的状态是否转换成固定连接, 否则转换成偶然连接。当连接关系维持到一定的时间后, 关系就会断开, 进入可变状态, 方便下次建立连接。但当固定关系维持时间超过一定的时间后断开连接关系, 先进入到中间状态, 当经历两次固定连接之间的中间状态维持

时间后转化成可变状态。当连接断开时, 将节点重新返回到原来的两个数组 $Array_m$ 和 $Array_f$ 中, 方便下次建立连接, 在建立新连接时, 利用生成网络算法中的步骤(6)和步骤(7)建立连接。

2.4 网络加权确立

一般的基于网络的性接触疾病传播模型中, 对两个节点之间传播概率的计算做了如下假设: 规定网络中两个伙伴之间的性行为的次数是固定的; 每个个体在单位时间内总的性行为次数与其伙伴数量成正比。这样假设是不现实的, 且与经验数据相矛盾。

在性接触网络中, 把两个节点间的边的权重看作是单位时间(本文为年)内两个个体间实际发生的接触次数(RSA)。从网络拓扑结构中获得任何两个交互个体对的实际发生次数(RSA)是基于 3 个简单的生理学假设: (1)给每个个体确定一个潜在的性接触次数(PSA), PSA 可以看作是个体可能性行为的定量描述。(2)每个个体把他/她的潜在性接触次数再与其相连的伙伴进行分配。每个个体潜在的性接触次数与个体的类型以及个体的度有关, FSW 人群潜在的次数大, 且度大的个体潜在次数大, 度小个体潜在次数小^[16]。(3)两个个体最终实际的性接触次数为两个个体分配给对方潜在次数中的较小值。

两个个体 F_i 和 M_j 间实际性接触次数依赖于 F_i 分配给 M_j 的潜在性接触次数, 也依赖于 M_j 分配给 F_i 的潜在性接触次数。其性接触次数分配如下:

(1) 确定不同类型个体潜在的性接触次数

经研究表明, 异性性接触次数总体上随伙伴数的增加而增加, 但随着伙伴数增加, 性接触次数与伙伴数不是线性关系^[19]。在异性性接触网络中, 女性人群按高危程度和伙伴数量分为 3 类人群: 普通人群(只有固定伙伴)、危险人群(有固定和偶然伙伴)和高危人群(FSW)(有固定、偶然和临时关系)。并根据相关文献估计潜在的性接触次数, 普通女性人群年接触次数为 60 次/年^[20], 危险女性人群年接触次数为 100 次/年^[21], 高危女性人群(CSW)年接触次数为 300 次/年^[12]。在异性性接触网络的男性人群中嫖客比其他男性有更多的非商业性伙伴, 所以模型中也将男性人群按高危程度和伙伴数量分为 3 类人群: 普通人群(只有固定伙伴)、危险人群(有固定和偶然伙伴)和高危人群(CSW)。普通男性人群年接触次数为 60 次/年^[20], 危险男性人群年接触次数为 100 次/年^[21], 文献表明 CSW 与 FSW 的接触次数为平均 30 次/年^[12], 所以将 CSW 人群每年性接触次数估计为 130 次/年。

每个个体要被指定一个单位时间内潜在的可能性接触次数 b_i 。然后该个体把他/她可能潜在的性接触次数在他/她的 k_i 个伙伴中进行分配, 定义个体间进行交互的可能性是可行的, 也就是女性 F_i 分配给男性 M_j 的可能潜在的性行为次数, 表示为: $[F_i \rightarrow M_j]$, 男性 M_j 分配给女性 F_i 的可能潜在的性行为次数, 表示为: $[M_j \rightarrow F_i]$ 。

(2) 分配实际性接触次数

潜在的性行为次数由个体在他/她的 k_i 个伙伴中进行分配, 首先给固定关系和临时关系分配一个给定值 P 和 Q 作为实际的性接触次数, 本文假设 $P=60, Q=30$ 。然后将剩下未分配的次数 $a_i = b_i - P - Q$ 根据偶然连接的持续时间进行加

权平均分配,以女性 F_i 分配男性 M_j 为例,分配的公式如下:

$$[F_i \rightarrow M_j] = a_i \times \frac{T_j}{R}, \text{其中 } T_j \text{ 是边 } E_{i,j} \text{ 的维持时间, } R \text{ 是节点}$$

F_i 所有偶然连接维持时间之和,即: $R = \sum_{j=1}^{k_i} T_j$ 。偶然连接维持时间 $t \sim B(3.2, 0.5)$ (t 服从二项分布),由于计算实际性接触次数是以年为单位时间,因此当偶然连接的维持时间大于一年时,可以将第一次分配的时间 T_j 设为一年,而在下一年这个偶然连接的维持时间 $T_j = t - 1$ 。

(3) 实际性接触次数的实现

两个个体 F_i 和 M_j 之间实际性接触次数由 $W(i, j)$ 表示,根据现实可能的情况得到 $W(i, j) = \min([F_i \rightarrow M_j], [M_j \rightarrow F_i])$,因为个体 F_i 与伙伴 M_j 现实的性接触次数不可能比个体 M_j 与个体 F_i 实现的性接触次数多,相反也是如此。因此可以得出 $W(i, j) = W(j, i)$ 。其性接触网络接触次数分配方法如图 4 所示^[16]。

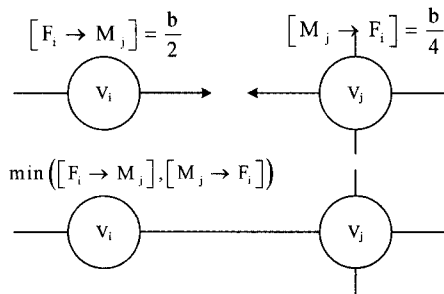


图 4 接触次数分配原理

3 Agent 模型

3.1 Agent 病程模型

在大部分基本疾病传播模型中,人群包括易感(susceptible)和感染(Infected)两类。为了简便,假设已感染个体立即具有感染性,即个体一旦被感染就可向其他个体传播,而且限于目前医疗水平,感染 HIV 后不能康复,病程发展到一定程度个体会死亡,所以疾病的传播由人群接触网络结构和易感个体与已感染个体之间接触的 HIV 传播概率来控制。异性 HIV 通过固定关系、偶然关系和商业性关系(即临时关系)进行传播,当关系中的任意一方为 HIV 阳性时,另一方将以一定的概率被感染。

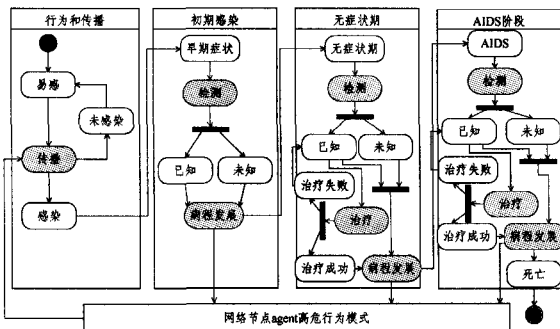


图 5 agent 个体关系行为与病程状态关系图

在易感-感染(SI)模型中对已感染个体的病程状态进行扩展。个体感染 HIV 后,病程的发展分为 3 个阶段:初期感染阶段(PI,约 12 周)、无症状阶段(PA,8~10 年)和 AIDS 阶段(AIDS,1~2 年),不同病程时期,HIV 传播的概率也不同。

为了研究方便,假设个体每个时期的持续时间都服从正态分布。异性接触关系的群体构成的 HIV 传播网络中,个体以一定的概率接受检测和治疗,agent 个体关系行为与病程状态关系如图 5 所示。

易感个体通过高危行为与已感染 HIV 的异性性接触,HIV 就以一定的概率在个体之间进行传播,感染个体进入初期感染阶段,在不接受外界干预的情况下,感染个体会随时间进入到无症状期和 AIDS 时期,最后死亡,且个体行为和每个阶段的传播概率不发生改变。处在各个时期的感染者都以一定的概率进行检测,当检测出感染 HIV 时,个体会增加安全套的使用率,从而 HIV 传播的可能性减小。被检测感染 HIV 的个体则以一定的比例接受治疗,由于感染初期的时间较短,假设感染初期不进行治疗。在无症状期治疗成功的个体其寿命延长时间 $t_1 \sim B(26, 0.5)$,ADIS 时期治疗成功的个体其寿命延长时间 $t_2 \sim B(10, 0.5)$,治疗失败的个体寿命延长时间 $t_3 \sim B(5, 0.5)$ ^[12]。接受治疗的个体因其体内病毒载荷的减少,HIV 传播的概率会减小,但由于药物的副作用和治疗会有一些负面效应,因此会有一些人放弃继续治疗,从而停止治疗,接受治疗的个体其生命会有所延长,但也使得感染其他个体的机会有所增加。

3.2 Agent HIV 传播模型

每个个体/agent 在异性传播网络中有可能通过性接触感染或被感染 HIV,其传播的概率与接触个体的感染情况、伙伴类型(固定、偶然和临时)、每个仿真时间(年)的性接触次数、性接触的安全行为(是否使用安全套)和个体病情是否知情等有关,如图 6 所示。

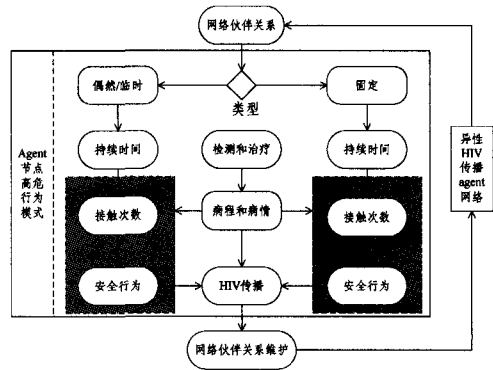


图 6 HIV 传播模型

根据上述描述,得出 agent HIV 传播概率模型:

(1) 疾病传播的概率与个体的病程有关,PI、PA 和 AIDS 3 个阶段的单次接触传播概率分别记为 TP_1 、 TP_2 和 TP_3 ,由于处在 AIDS 阶段的病人苦于机会疾病的困扰,假设 $TP_3 = 0$ ^[4]。

(2) 一次高危行为疾病传播的概率与个体的高危行为是否采用安全套措施有关,安全套有效率为 sp 。

(3) 高危行为是否采用安全行为与伙伴的类型有关,固定伙伴行为采用安全行为的概率低,偶然和临时伙伴行为采用安全行为的概率较高。模型中固定伙伴安全行为的概率为 P_s ,偶然伙伴的概率为 P_c ,临时伙伴关系为 P_l 。

(4) 高危行为的安全行为与参与个体的病情是否知情有关。已知病情的个体会提高安全套的使用率,针对高危行为群体 HIV 病毒检测干预措施可以显著提高该群体的病情知

晓率,从而提高安全行为的概率,本文已知病情是个体采用安全套的概率为 79.8%^[22]。

(5)疾病传播的概率与个体是否接受治疗有关。接受治疗的个体其传播概率会减小,提高对已知病情的个体的治疗比例,有利于减小传播的概率,但是由于延长了感染者的寿命,病原体停留的时间增长,会导致感染的人增加。接受治疗的个体单次接触传播概率可减少 80%^[23](用 p_t 表示)。

(6)个体在单位时间内的传染概率还与个体的高危行为频次有关,个体与其 k_i 个伙伴间高危次数进行分配,传播的概率与实际发生的高危次数有关,模型中实际发生次数为 $n_{i,j}^{EC}$ 。

综上所述,不接受治疗的个体传播 HIV 的概率如式(6)所示,研究 HIV 传播通常用年作为仿真步长,而初期感染阶段持续大约 3 个月(0.25 年)^[24],比一年要短,因此我们采用时间的加权平均来计算感染初期一年的单次传播概率,即 $T_1 \times TP_1 + (1 - T_1) \times TP_2$,其中 T_1 为在一年中感染初期所占时间的比例, $1 - T_1$ 为一年中 PA 所占时间的比例。接受治疗的个体其传播概率 $p_{ij}^T = (1 - p_t) p_{ij}$ 。

$$p_{ij} = \begin{cases} 0, (V_i \wedge V_j) \text{ 为易感状态或者 } (V_i \wedge V_j) \text{ 为感染状态} \\ 1 - [1 - (1 - sp)(T_1 \times TP_1 + (1 - T_1) \times TP_2)]^{n_{i,j}^{EC}}, \\ \quad V_j \text{ 为感染状态,且为 PI 阶段, } V_i \text{ 为易感状态} \\ 1 - [1 - (1 - sp)TP_2]^{n_{i,j}^{EC}}, V_j \text{ 为感染状态,且为 PA 阶段,} \\ \quad V_i \text{ 为易感状态} \end{cases} \quad (6)$$

4 加权二部无标度网络异性 HIV 传播仿真

为便于 HIV 传播仿真的实现,使用基于 agent 的开发工具 NetLogo 作为仿真平台^[25]。由于开发工具计算能力的限制,选择网络规模为 10000 人。利用 NetLogo 对参数进行控制仿真,实验使用数据主要以中国疾病预防控制中心研究人员对中国异性 HIV 传播研究的数据为基础,其中部分数据参考了国际上的相关数据,参数取值及其说明如表 1 所列。

利用表 1 的数据设置网络参数,以年作为仿真周期,仿真流程如下:

(1)根据给定的参数生成初始加权二部图无标度网络,初始化网络的权值(个体间实际性行为次数)、连接状态(固定、偶然和临时)和边的持续时间。

(2)选定初始感染个体,设定感染个体的状态,确定感染个体各个时期的持续时间,设定仿真步长 $T=50$,仿真时间 $t=0$ 。

(3)判断个体间连接维持时间是否超过持续时间,如果有,则断开连接,将节点放回到数组 $Array_m$ 和 $Array_f$ 中。

(4)在数组 $Array_m$ 和 $Array_f$ 中随机选择点建立边,直到不能建立边为止。

(5)给出病程、检测和治疗对 HIV 传播的影响参数。

(6)计算传播概率,进行 HIV 传播模拟。

(7)更新各类人群数,统计感染人数,死亡后的个体用一个易感个体来取代。 $t=t+1$,如果 $t < T$,则返回步骤(3),否则停止仿真。

表 1 网络仿真参数取值(单位:年)

| 参数及其含义 | 取值或范围 | 参考文献 |
|---------------------------|-------------------|---------|
| 网络总人数(N) | 10000 | 本文设定 |
| 男性幂律分布指数(λ_m) | 2.6 | [4,12] |
| 女性幂律分布指数(λ_f) | 3.1 | [4,12] |
| 男性节点度为 0 的概率 | 0.01 | [4,12] |
| 女性节点度为 0 的概率 | 0.01 | [4,12] |
| 男性网络节点最大度 | 40 | 本文设定 |
| 女性网络节点最大度 | 80 | 本文设定 |
| FSW 人群比例 | 0.08 | [26] |
| 初期感染维持时间 | normal(0.25,0.05) | [24] |
| 无症状期维持时间 | normal(9,0.5) | [27,28] |
| AIDS 阶段维持时间 | normal(1.5,0.3) | [28] |
| 初始感染人数比 | 0.1% | 本文设定 |
| FSW 人群每年潜在性行为次数 | 300 | [12,20] |
| 危险女性人群每年潜在性行为次数 | 100 | [21] |
| 普通女性人群每年潜在性行为次数 | 60 | [20] |
| CSW 人群每年潜在性行为次数 | 130 | 本文设定 |
| 危险男性人群每年潜在性行为次数 | 100 | [21] |
| 普通男性人群每年潜在性行为次数 | 60 | [20] |
| 节点存在固定连接的概率 | 60% | 本文设定 |
| 固定连接维持时间 | B(16,0.5) | [29,30] |
| 偶然连接维持时间 | B(3.2,0.5) | [29,30] |
| 临时关系维持时间 | 一次性关系 | |
| 男性感染者对女性一次无保护性行为为感染初期传播概率 | 0.002 * 11 | [22] |
| 女性感染者对男性一次无保护性行为为感染初期传播概率 | 0.001 * 11 | [22] |
| 男性感染者对女性一次无保护性行为无症状期传播概率 | 0.002 | [12,22] |
| 女性感染者对男性一次无保护性行为无症状期传播概率 | 0.001 | [12,22] |
| AIDS 阶段传播概率 | 0 | [12] |
| 初始固定连接安全套使用率 | 30% | [26,31] |
| 初始偶然连接安全套使用率 | 50% | [26,31] |
| 初始临时连接安全套使用率 | 70% | [26,31] |
| 已知感染 HIV 个体安全套使用率 | 79.8% | [22] |
| 安全套有效的概率 | 90% | [22] |
| 每年接受检测个体的比例 | 20% | [12,23] |
| 每年接受治疗个体的比例 | 73.8% | [23] |
| 每年退出治疗个体的比例 | 8% | [23] |
| 接受治疗个体单次接触减少传播率 | 80% | [23] |
| 无症状期治疗成功个体延长的寿命 | B(26,0.5) | [23] |
| AIDS 期治疗成功个体延长的寿命 | B(10,0.5) | [23] |
| 治疗失败个体寿命延长时间 | B(5,0.5) | [23] |

注:normal(val1, val2)表示正态分布,B(n,p)表示二项分布。

4.1 网络特性

利用表 1 的网络参数生成网络,根据男女节点度总和相同,得到男性节点数 5516,女性节点数 4484,并得到图 2 所示的二部图网络和图 7 所示的度分布图。从图中可以看出,网络中男性和女性节点度分布的测量值服从幂律分布,度分布曲线很接近幂律分布函数的标准值,且围绕着标准值在较小范围内波动。从图中也可以看出,无标度网络中网络节点度分布具有一定的拖尾性。

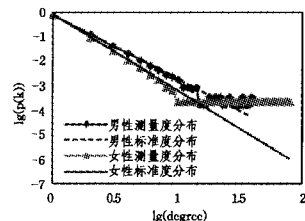


图 7 异性性接触二部图度分布

4.2 提高安全行为措施对 HIV 传播的影响

利用表 1 的仿真参数,改变 FSW 人群的安全措施比例,

对男性和女性中的高危人群 HIV 感染比例以及总感染人数进行统计,得出如图 8 所示的 HIV 感染比例曲线图。从图 8 (a)中可知,提高 FSW 人群安全套使用比例,可以明显减少 FSW 和 CSW 人群中 HIV 感染者的比例,并且在图 8(b)中的总 HIV 感染者的比例下降明显。说明在 HIV 传播过程中,FSW 起到主导作用,如果很好地控制 FSW 人群安全措施的比例,可以明显减少 HIV 感染人数。

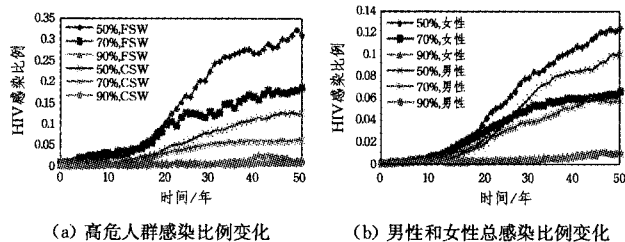


图 8 高危人群检测对 HIV 感染比例的变化

4.3 全部检测对高危人群 HIV 传播的影响

在异性 HIV 性传播网络中,初始取值如表 1 所列,所有感染个体不参与治疗,初始感染人数为 0.1%,固定、偶然和临时连接初始安全套使用比例分别为 30%、50%和 50%,检测后已知感染 HIV 的个体会改变高危行为方式,从而提高自己安全套的使用率,伙伴安全套的使用率都提升到 79.8%。根据不同的检测比例措施进行模拟得到如图 9 所示的 HIV 传染率曲线,从图中可以看出,随着检测比例的提高,HIV 感染的人数会减少,但感染人数减少速率也会减小。

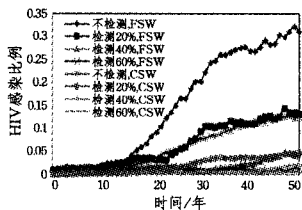


图 9 检测对 HIV 传播影响

由于检测已知感染 HIV 的个体会提高自己的安全措施行为,安全措施可以减小 HIV 传播的概率,因此当检测比例增加时,患者被检测出患有 HIV 的可能性增加,从而使用安全套的人数也会增加,使得 HIV 传播的概率减小,从而感染 HIV 的人数减少。

4.4 检测和治疗综合措施对 HIV 传播的影响

在社会网络中,被检测患有 HIV 的个体以一定的概率进行治疗,接受治疗的个体体内的 CD₄ 细胞数会减少,促使其感染其他个体的概率减小。根据不同的检测和治疗比例措施得到 HIV 传播曲线图,如图 10 所示。从图中可以看出,在相同的检测比例下,提高治疗的比例后,前期 HIV 传播会增加,但随着时间的推移,感染速率减小,从长远来看,接受治疗可以减少 HIV 感染人数。这是由于被治疗的个体寿命得到延长,但是感染源停留在网络中的时间延长,使得感染的可能性有所增加,导致感染的人数超过不治疗网络中的感染人数,但随着时间的推移,接受治疗的人越来越多,HIV 被传播的概率就越来越小,所以感染的人数会低于不治疗时感染的人数。因此,提高检测和治疗的比例,长期来讲有利于延长病人的生存期,减少人群中 HIV 的感染人数。

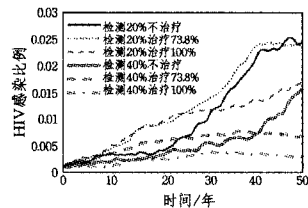


图 10 检测和治疗综合措施对 HIV 传播的影响

结束语 将 agent 微观仿真方法与复杂网络模型结合起来,利用动态加权二部图无标度网络来研究异性 HIV 传播,在网络生成过程中将女性人群根据高危行为不同分为普通人群和 FSW,男性人群根据高危行为不同分为普通人群和 CSW,根据不同人群之间的连接把边分为固定连接、偶然连接和临时连接,且不同的连接关系分配的权值也不一样。在仿真 HIV 传播的过程中,考虑了个体高危行为是否采用安全措施、是否参加自愿咨询检测和是否参加抗病毒治疗等干预措施对疾病传播的影响。仿真实验得出一些有利结论:提高高危人群安全套比例能显著减少 HIV 感染人数,说明高危人群在 HIV 传播过程中起主导作用。对检测感染 HIV 后的个体进行抗病毒治疗,一方面有利于控制 HIV 传播趋势,另一方面由于 HIV 感染者寿命延长,存活的 HIV 感染者数量增多,这些存活的 HIV 感染者有机会感染其他人,增加了 HIV 传播控制的复杂性。理想的情况是一旦感染就能被检测,一旦被检测感染就实施治疗,检测治疗后的所有个体都能发生行为改变,采取安全行为。这样方可最大限度地控制 HIV 传播趋势,而在实际中是否可行,人们还在激烈的争辩中。本文模型为进一步研究 HIV 疫情发展与政策干预效果提供了一个新的工具。

参考文献

- [1] Kretzschmar M, Wiessing L G. Modelling the spread of HIV in social networks of injecting drug users [J]. AIDS, 1998(12): 801-811
- [2] Eyob T, Marwala T, Mueller C. Agent-Based Modelling: A case study in HIV Epidemic [C]// IEEE Proceedings of the 4th International Conference on Hybrid Intelligent Systems. 2004: 154-159
- [3] 李璐, 宣慧玉, 高宝俊. 基于元胞自动机的异质个体 HIV/AIDS 传播模型[J]. 系统管理学报, 2008, 17(6): 704-710
- [4] Mei S, Sloot P M A, Quax R, et al. Complex agent networks explaining the HIV epidemic among homosexual men in Amsterdam [J]. Mathematics and Computers in Simulation, 2010, 80(5): 1018-1030
- [5] Bai Wen-jie, Wang Zhou-tao, Bing Hong. Interplay between HIV/AIDS Epidemics and Demographic Structures Based on Sexual Contact Networks [J]. International Journal of Modern Physics C, 2007, 18(6): 1025-1045
- [6] Liljeros F, Edling C R, Amaral L A N, et al. The web of human sexual contacts [J]. Nature, 2001, 411: 907-908
- [7] Sumodhee C, Hsieh J, Sun C, et al. Impact of Social Behaviors on HIV Epidemic: A Computer Simulation View [J]. Int. Conf. on Computational Intelligence for Modelling, Control and Automation, 2005, 2: 550-556
- [8] 李玮, 毕贵红, 张寿明. 基于 agent 动态小世界网络的 HIV 同性

传播仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2012, 24(1): 189-195

- [9] Kiss I Z, Green D M, Kao R R. The effect of network mixing patterns on epidemic dynamics and the efficacy of disease contact tracing [J]. *Journal of The Royal Society Interface*, 2008, 5: 791-799
- [10] Sloot P, Ivanov S. Stochastic simulation of HIV population dynamics through complex network modeling [J]. *International Journal of Computer Mathematics*, 2007, 85(8): 1175-1187
- [11] 臧春鹏, 王宁. 抗病毒治疗在阻断艾滋病传播流行中的作用[J]. *中华临床医师杂志: 电子版*, 2011, 5(8): 2343-2346
- [12] 王俊杰. 动力学模型在我国艾滋病五类高危人群传播规律分析中的应用[D]. 北京: 中国疾病预防控制中心, 2011: 1-129
- [13] Granich R M, Glikhs C F. Universal voluntary HIV testing with immediate antiretroviral therapy as a strategy for elimination of HIV transmission: a mathematical model [J]. *The Lancet*, 2008, 313: 48-57
- [14] Ergün G. Human sexual contact network as a bipartite graph [J]. *Physical A*, 2002, 308(1): 483-488
- [15] 温罗生, 杨小帆, 钟将. 在二部无标度网上的两性疾病传播[J]. *物理学报*, 2008, 57(8): 4794-4799
- [16] Moslonka-Lefebvre M, Bonhoeffer S, Alizon S. Weighting for sex acts to understand the spread of STI on networks [J]. *Journal of Theoretical Biology*, 2012, 311(21): 46-53
- [17] Gilbert N. *Agent-based models*[M]. SAGE Publications, Incorporated, 2007
- [18] Bender E, Canfield E. The asymptotic number of labeled graphs with given degree sequences [J]. *Combinatorial Theory, Series A*, 1978, 24: 296-307
- [19] Baggaley R F, White R G, Boily M-C. HIV Transmission Risk Through Anal Intercourse: Systematic Review, Meta-Analysis and Implications for HIV Prevention [J]. *International Journal of Epidemiology*, 2010, 39(4): 1048-1063
- [20] Graw F, Leitner T, Ribeiro R M. Agent-based and phylogenetic analyses reveal how HIV-1 moves between risk groups: Injecting drug users sustain the heterosexual epidemic in Latvia [J]. *Epidemics*, 2012, 4(2): 104-116
- [21] Leclerc P M, Matthews A P, Garenne M L. Fitting the HIV Epidemic in Zambia: A Two-Sex Micro-Simulation Model [J]. *PLoS ONE*, 2009, 4(5): e5439
- [22] Giovanna Merli M, Hertog S, Wang B, et al. Modelling the spread of HIV/AIDS in China: the role of sexual transmission [J]. *Popul Stud (Camb)*, 2006, 60(1): 1-22
- [23] 臧春鹏, 王宁. 抗病毒治疗对艾滋病传播流行的影响[D]. 北京: 中国疾病预防控制中心, 2011: 1-115
- [24] Anderson R M, Medley G. Epidemiology of HIV infection and AIDS: incubation and infectious periods [J]. *Survival and vertical transmission, AIDS*, 1988, 2(1): 57-63
- [25] Wilensky U. *NetLogo* [OL]. <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/>. Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern University, Evanston, IL, 1999
- [26] 王岚, 王璐, 丁正伟, 等. 中国 1995-2009 年艾滋病哨点监测主要人群艾滋病病毒感染流行趋势分析[J]. *中华流行病学*, 2011, 32(1): 20-24
- [27] Medley G F, Anderson R M, Stoneburner R, et al. Incubation period of AIDS in patients infected via blood transfusion [J]. *Nature*, 1987, 328(6132): 719-721
- [28] Rothenberg R, Woelfel M, Stoneburner R, et al. Survival with the acquired immunodeficiency syndrome, Experience with 5833 cases in New York City [J]. *New England Journal of Medicine*, 1987, 317(21): 1297-1302
- [29] viera I T, Cheng R C H, Harper P R, et al. Small world network models of the dynamics of HIV infection [J]. *Annals of Operations Research*, 2010, 178(1): 173-200
- [30] Bershteyn A, Klein D J, Wenger E, et al. Description of the EMO-HIV Model v0. 7[M]. 2012
- [31] High-risk behaviours and HIV/syphilis prevalence among men who have sex with men in Beijing[Z]. *China CDC*, 2008

(上接第 47 页)

- [22] Xue T, Liu J, Tang X. Example-based 3D object reconstruction from line drawings[C]//*Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2012 IEEE Conference on. IEEE, 2012: 302-309
- [23] Brown E, Wang P. 3D Object Recovery from 2D Images: A New Approach[J]. *SPIE Proc. Robotics and Computer Vision*, 1996, 2904: 138-145
- [24] Shoji K, Kato K, Toyama F. 3-D interpretation of single line drawings based on entropy minimization principle[C]//*Computer Vision and Pattern Recognition*, 2001. CVPR 2001. Proceedings of the 2001 IEEE Computer Society Conference on. IEEE, 2001, 2: 90-95
- [25] Rich E, Knight K. *Artificial Intelligence* [M]. McGraw-Hill, 1991
- [26] Melanie M. *An introduction to genetic algorithms* [M]. Cambridge, Massachusetts London, England, Fifth printing, 1999
- [27] Russell S J, Norvig P. *Artificial intelligence: a modern approach (2nd ed.)*[M]. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall, 2003
- [28] Brent R P. *Algorithms for minimization without derivatives* [M]. Courier Dover Publications, 1973
- [29] Polak E. *Computational methods in optimization: a unified approach*[M]. Academic press, 1971
- [30] Marquardt D W. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters[J]. *Journal of the Society for Industrial & Applied Mathematics*, 1963, 11(2): 431-441
- [31] Axler S. *Linear algebra done right*[M]. Springer, 1997
- [32] Trefethen L N, Bau III D. *Numerical linear algebra*[M]. Society for Industrial and Applied Mathematics, 1997
- [33] Press W H, Teukolsky S A, Vetterling W T, et al. *Numerical recipes in C++: the art of scientific computing* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2009
- [34] Kindermann R, Snell J L. *Markov random fields and their applications* [M]. Providence, RI: American Mathematical Society, 1980
- [35] Tian C, Masry M, Lipson H. Physical sketching: Reconstruction and analysis of 3D objects from freehand sketches[J]. *Computer-Aided Design*, 2009, 41(3): 147-158