

媒体干预下的 MSM 群体艾滋病传播模型研究

崔景安, 范圣洁, 陈方媛

(北京建筑大学 理学院, 北京 102616)

摘要:为探究新媒体时代,宣传教育对艾滋病在 MSM(男男性行为接触者)群体中的防控效果,在建立一类 MSM 群体艾滋病传播模型的基础上引入媒体因子,并针对这类模型进行理论分析.通过模型计算,得出在无媒体干预下,MSM 群体艾滋病传播的基本再生数 $R_0 = 4.59$;在不同措施中,宣传安全套的使用比其他宣传策略更加有效,且提高与固定性伴安全套使用率对 R_0 影响更大.同时,得出 MSM 人群中有 36.7% 的艾滋病感染者未被发现,而每年新增感染者中有 51.3% 是被这些没有被发现的感染者所传染,利用新媒体加强对 MSM 群体艾滋病预防的宣传教育可有效控制 HIV 的进一步蔓延.

关键词:男男性接触;艾滋病;数学模型

中图分类号:O175.1

文献标志码:A

MSM 群体一直是 HIV 感染的高危人群,也是我国感染艾滋病增长最快的人群之一,具有性行为方式高危,安全套使用率低,性伴多等特点^[1].MSM 传播造成的每年新增艾滋病感染人数所占比例从 1985—2005 年间的 0.3% 增至 2015 年的 27.2%.北京、广州、沈阳等大城市的男性同性恋人群艾滋病病毒感染率在 1% 以上.截至 2016 年 10 月 31 日,北京市累计报告艾滋病病毒感染者及病人共 21 886 例,其中同性传播 14 451 例(占 66.03%),每年新增感染者及病人中,男男同性性行为所占比例从 2011 年的 61.7% 增加到 2016 年 10 月底的 73.9%^[2].南昌市疾病预防控制中心发布通告称 2011—2015 年新发学生病例中,男男同性传播占 83.61%,同性传播已成为青年学生感染艾滋病的主要途径^[3].

在中国,迫于社会和家庭的压力,MSM 目标人群一般比较隐蔽,在现实中对 MSM 人群开展宣传教育难度很大.但近年来,随着新媒体的迅速发展,特别是智能手机的普及,新兴交友软件逐渐成为 MSM 交友的主要方式,疾控部门更容易利用新媒体平台对 MSM 群体进行定位,并对其实施有针对性的干预措施.国内一项调查显示,MSM 中选择新媒体(Blued,微信等)进行交往的比例高达 89.5%^[4].2016 年,同志交友软件 Blued 拥有 2200 万的注册用户,日活跃用户高达数百万^[5].在新媒体时代,媒体宣传干预作为控制艾滋病流行的主要策略能够发挥更大的作用.

文献[6—7]讨论了不同干预组合措施对北京 MSM 人群中艾滋病感染者的影响.文献[8]提出并研究了饱和媒体影响因子对 SIS 模型的影响.为了反映艾滋病不同感染阶段的区别,在文献[7]的基础上,本文根据 CD4 水平的不同将 HIV 模型分成 3 个感染阶段,并且修改了检测后的易感者被感染后成为未检测感染者这一过程.其次,本文参考文献[8]在 HIV 模型中引入媒体因子,分析宣传教育作用于不同干预措施对 MSM 群体艾滋病传播的影响.

1 模型的建立

根据是否做过检测,是否做过治疗,将 MSM 人群分为 3 类(如图 1): S_N, I_N^1, I_N^2, I_N^3 为未做检测的 MSM

收稿日期:2016-12-23;修回日期:2017-03-31.

基金项目:国家自然科学基金(11371048)

作者简介(通信作者):崔景安(1963—),男,河北容城人,北京建筑大学教授,博士生导师,研究方向为常微分方程与动力系统,生物数学,E-mail:cuijingan@bucea.edu.com.

人群, S_T, I_T^1, I_T^2, I_T^3 为检测后的 MSM 人群, I_A^1, I_A^2, I_A^3 为接受治疗的 MSM 人群. 与文献[7]不同的是, 假设检测后进入 S_T 仓室的易感 MSM 人群被感染后再次进入 I_N^1 仓室, 而非 I_T^1 仓室. I_N^1 仓室的 MSM 需要再一次检测才能进入 I_T^1 . 易感者被感染后, 根据体内 CD4 细胞的数量被分为 3 个感染阶段: CD4 数量 $\geq 350/\text{uL}$ (I_N^1, I_T^1, I_A^1), CD4 数量大于等于 $200/\text{uL}$ 且小于 $350/\text{uL}$ (I_N^2, I_T^2, I_A^2), CD4 数量 $< 200/\text{uL}$ (I_N^3, I_T^3, I_A^3). 其中, MSM 群体总人口设为 $N(t) = S_N(t) + S_T(t) + I(t)$, 总感染人口的 $I(t) = \sum_{i=N,T,A} \sum_{j=1}^3 I_i^j(t)$. 为探究媒体对不同于干预措施的影响效果, 根据文献[8], 定义媒体影响因子: $g_1(I) = 1 + a_1 \frac{I}{b_1 + I}, g_2(I) = 1 + a_2 \frac{I}{b_2 + I}, g_3(I) = 1 + a_3 \frac{I}{b_3 + I}$, 其中 g_1 表示媒体宣传对检测率的影响, g_2 表示媒体宣传对参与治疗率的影响, g_3 表示媒体宣传对安全套使用率的影响. 当 $a_1 = a_2 = a_3 = 0$ 时, 表示没有媒体影响. 其参数说明见表 2. 根据以上假设, 建立模型如下:

$$\begin{cases} dS_N/dt = \alpha - (g_1 k_1 + \lambda_N + \mu) S_N, \\ dI_N^1/dt = \lambda_N S_N + \lambda_T S_T - (g_1 k_2 + \rho_1 + \mu) I_N^1, \\ dI_N^2/dt = \rho_1 I_N^1 - (g_1 k_3 + \rho_2 + \mu) I_N^2, \\ dI_N^3/dt = \rho_2 I_N^2 - (g_1 k_4 + m + \mu) I_N^3, \\ dS_T/dt = g_1 k_1 S_N - (\lambda_T + \mu) S_T, \\ dI_T^1/dt = g_1 k_2 I_N^1 + \phi_1 I_A^1 - (g_2 \tau_1 + \rho_1 + \mu) I_T^1, \\ dI_T^2/dt = g_1 k_3 I_N^2 + \phi_2 I_A^2 + \rho_1 I_T^1 - (g_2 \tau_2 + \rho_2 + \mu) I_T^2, \\ dI_T^3/dt = g_1 k_4 I_N^3 + \phi_3 I_A^3 + \rho_2 I_T^2 - (g_2 \tau_3 + m + \mu) I_T^3, \\ dI_A^1/dt = g_2 \tau_1 I_T^1 - (\phi_1 + \mu) I_A^1, \\ dI_A^2/dt = g_2 \tau_2 I_T^2 - (\phi_2 + \mu) I_A^2, \\ dI_A^3/dt = g_2 \tau_3 I_T^3 - (\phi_3 + m_1 + \mu) I_A^3, \end{cases} \quad (1)$$

其中,

$$\lambda_N = [(1 - g_3 \pi_{NC}) C_{NC} + (1 - g_3 \pi_{NR}) C_{NR}] \left(\frac{\beta_1 I_N^1 + \beta_2 I_N^2 + \beta_3 I_N^3 + \epsilon_1 (\beta_4 I_T^1 + \beta_5 I_T^2 + \beta_6 I_T^3) + \epsilon_1 \epsilon_2 (\beta_7 I_A^1 + \beta_8 I_A^2 + \beta_9 I_A^3)}{N} \right),$$

$$\lambda_T = [(1 - g_3 \pi_{TC}) C_{TC} + (1 - g_3 \pi_{TR}) C_{TR}] \left(\frac{\beta_1 I_N^1 + \beta_2 I_N^2 + \beta_3 I_N^3 + \epsilon_1 (\beta_4 I_T^1 + \beta_5 I_T^2 + \beta_6 I_T^3) + \epsilon_1 \epsilon_2 (\beta_7 I_A^1 + \beta_8 I_A^2 + \beta_9 I_A^3)}{N} \right).$$

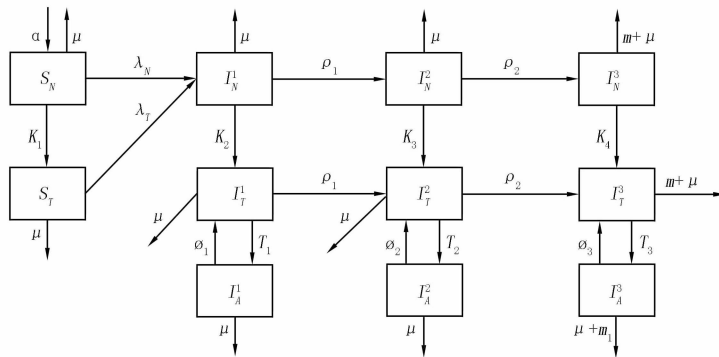


图1 MSM人群中艾滋病传播框图

MSM 性伴中有固定性伴和非固定性伴的区别, 因此模型中用 π_{NR}, C_{NR} 分别表示未做过检测的 MSM 中与固定性伴安全套使用率及高危性行为次数, 用 π_{NC}, C_{NC} 分别表示未做过检测的 MSM 中与非固定性伴安全套使用率及高危性行为次数; 用 π_{TR}, C_{TR} 分别表示检测过的 MSM 中与固定性伴安全套使用率及高危性行为次数, 用 π_{TC}, C_{TC} 分别表示检测过的 MSM 中与非固定性伴安全套使用率及高危性行为次数^[9-10].

由(1)式得 $dN/dt = \alpha - \mu N - m(I_A^1 + I_A^2 + I_A^3) \leq \alpha - \mu N$, 若 MSM 人群中没有艾滋病感染者则 $N \rightarrow \alpha/\mu$,

$t \rightarrow \infty$, 所以 α/μ 是 $N(t)$ 的上界.

通过分析可知系统(1)的可行域为:

$$\Omega = \{ (S_N, I_N^1, I_N^2, I_N^3, S_T, I_T^1, I_T^2, I_T^3, I_A^1, I_A^2, I_A^3) \in \mathbf{R}_+^{11} : S_N + I_N^1 + I_N^2 + I_N^3 + S_T + I_T^1 + I_T^2 + I_T^3 + I_A^1 + I_A^2 + I_A^3 \leq \frac{\alpha}{\mu} \}. \quad (2)$$

易验证 Ω 是系统(1)的正不变集.

2 基本再生数

对于传染性疾病,基本再生数是非常重要的阈值参数,它反映了疾病在人群中是否能够流行.系统(1)的无病平衡点为 $E_0 : (\bar{S}_N, \bar{I}_N^1, \bar{I}_N^2, \bar{I}_N^3, \bar{S}_T, \bar{I}_T^1, \bar{I}_T^2, \bar{I}_T^3, \bar{I}_A^1, \bar{I}_A^2, \bar{I}_A^3) = (\frac{\alpha}{k_1 + \mu}, 0, 0, 0, \frac{\alpha k_1}{\mu(k_1 + \mu)}, 0, 0, 0, 0, 0, 0)$. 利用文献[11]计算再生矩阵的方法,当 $a_1 = a_2 = a_3 = 0$ 时,有:

$$F = (P_N + P_T) \begin{bmatrix} \beta_1 & \beta_2 & \beta_3 & \epsilon_1 \beta_4 & \epsilon_1 \beta_5 & \epsilon_1 \beta_6 & \epsilon_1 \epsilon_2 \beta_7 & \epsilon_1 \epsilon_2 \beta_8 & \epsilon_1 \epsilon_2 \beta_9 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$V = \begin{bmatrix} k_2 + \rho_1 + \mu & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\rho_1 & k_2 + \rho_2 + \mu & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\rho_2 & k_4 + m + \mu & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -k_2 & 0 & 0 & \tau_1 + \rho_1 + \mu & 0 & 0 & 0 & -\phi_1 & 0 & 0 \\ 0 & -k_3 & 0 & -\rho_1 & \tau_2 + \rho_2 + \mu & 0 & 0 & 0 & -\phi_2 & 0 \\ 0 & 0 & -k_4 & 0 & -\rho_2 & \tau_3 + m + \mu & 0 & 0 & 0 & -\phi_3 \\ 0 & 0 & 0 & -\tau_1 & 0 & 0 & \phi_1 + \mu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\tau_2 & 0 & 0 & \phi_2 + \mu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\tau_3 & 0 & 0 & \phi_3 + \mu & 0 \end{bmatrix},$$

$R_0 = \rho(FV^{-1})$, ρ 表示再生矩阵 FV^{-1} 的谱半径.

计算可得

$$R_0 = (P_N + P_T)(M_1 + M_2 + M_3 + M_4 + M_5 + M_6 + M_7 + M_8 + M_9). \quad (3)$$

这里, $P_N = [(1 - \pi_{NC})C_{NC} + (1 - \pi_{NR})C_{NR}]$, $P_T = [(1 - \pi_{TC})C_{TC} + (1 - \pi_{TR})C_{TR}]$,

$$M_1 = \frac{\beta_1}{k_2 + \rho_1 + \mu}, M_2 = \frac{\beta_2 \rho_1}{(k_3 + \rho_2 + \mu)(k_2 + \rho_1 + \mu)}, M_3 = \frac{\beta_3 \rho_1 \rho_2}{(k_3 + \rho_2 + \mu)(k_2 + \rho_1 + \mu)(k_4 + m + \mu)},$$

$$M_4 = \frac{\epsilon_1 \beta_4 k_2}{(k_2 + \rho_1 + \mu)(\tau_1 + \rho_1 + \mu)}, M_5 = \frac{\epsilon_1 \rho_1 \beta_5}{(k_2 + \rho_1 + \mu)(\tau_2 + \rho_2 + \mu)} (\frac{k_2}{\tau_1 + \rho_1 + \mu} + \frac{k_3}{k_3 + \rho_2 + \mu}),$$

$$M_6 = \frac{\epsilon_1 \rho_1 \rho_2 \beta_6}{(k_2 + \rho_1 + \mu)(\tau_3 + m + \mu)} [(\frac{k_2}{\tau_2 + \rho_1 + \mu} + \frac{k_3}{k_3 + \rho_2 + \mu}) \frac{1}{\tau_2 + \rho_2 + \mu} + \frac{k_4}{(k_3 + \rho_2 + \mu)(k_4 + m + \mu)}],$$

$$M_7 = \frac{\epsilon_1 \tau_1 \epsilon_3 k_2 \beta_7}{(k_2 + \rho_1 + \mu)(\tau_1 + \rho_1 + \mu)(\phi_1 + \mu)},$$

$$M_8 = \frac{\epsilon_1 \tau_2 \epsilon_2 \rho_1 \beta_8}{(k_2 + \rho_1 + \mu)(\tau_2 + \rho_2 + \mu)(\phi_2 + \mu)} (\frac{k_2}{\tau_1 + \rho_1 + \mu} + \frac{k_3}{k_3 + \rho_2 + \mu}),$$

$$M_9 = \frac{\epsilon_1 \epsilon_2 \rho_1 \rho_2 \tau_3 \beta_9}{(k_2 + \rho_1 + \mu)(\tau_3 + m + \mu)(\phi_3 + \mu)} \left[\frac{1}{\tau_2 + \rho_2 + \mu} \left(\frac{k_2}{\tau_1 + \rho_1 + \mu} + \frac{k_3}{k_3 + \rho_2 + \mu} \right) + \frac{k_4}{(k_3 + \rho_2 + \mu)(k_4 + \rho_2 + \mu)} \right].$$

R_0 中的每一项都具有生物学意义. 对于 M_1 项, 当一个新的 MSM 感染者进入 I_N^1 仓室, 处于 I_N^1 仓室的平均时间是 $1/(k_1 + \rho_1 + \mu)$, 其感染率为 β_1 , 所以一个感染者在 I_N^1 仓室停留时间内所传染的人数就是 M_1 . 对于 M_2 项, I_N^1 仓室中的感染者以 $\rho_1/(k_2 + \rho_1 + \mu)$ 比例进入 I_N^2 仓室, 处于 I_N^2 仓室的平均时间为 $1/(k_1 + \rho_2 + \mu)$, 其感染率为 β_2 , 所以 $\beta_2 \rho_1 / (k_3 + \rho_2 + \mu)(k_2 + \rho_1 + \mu)$ 表示在 I_N^2 仓室停留时间内所传染的人数. 其他项可以以此类推.

定理 1 如果 $R_0 < 1$, 系统(1) 的无病平衡点 E_0 是全局吸引的.

证明 由系统(1), 有 $\frac{dI_\Lambda^1}{dt} + (k_2 + \rho_2 + \mu)I_N^1 = \lambda_N S_N + \lambda_T S_T$, 由 $[I_N^1 e^{(k_2 + \rho_1 + \mu)t}]' = (\lambda_N S_N + \lambda_T S_T) e^{(k_2 + \rho_1 + \mu)t}$. 得

$$I_N^1(t) = I_N^1(0) e^{-(k_2 + \rho_1 + \mu)t} + e^{-(k_2 + \rho_1 + \mu)t} \int_0^t (\lambda_N S_N + \lambda_T S_T) e^{(k_2 + \rho_1 + \mu)s} ds,$$

$$\begin{aligned} \limsup_{t \rightarrow \infty} I_N^1(t) &= \limsup_{t \rightarrow \infty} [I_N^1(0) e^{-(k_2 + \rho_1 + \mu)t} + e^{-(k_2 + \rho_1 + \mu)t} \int_0^t (\lambda_N S_N + \lambda_T S_T) e^{(k_2 + \rho_1 + \mu)s} ds] \leq \limsup_{t \rightarrow \infty} (\lambda_N S_N + \\ &\lambda_T S_T) \cdot \limsup_{t \rightarrow \infty} [e^{-(k_2 + \rho_1 + \mu)t} \int_0^t e^{(k_2 + \rho_1 + \mu)s} ds] \leq \frac{P_N}{k_2 + \rho_1 + \mu} [(\beta_1 \limsup_{t \rightarrow \infty} (I_N^1) + \beta_2 \limsup_{t \rightarrow \infty} (I_N^2) + \\ &\beta_3 \limsup_{t \rightarrow \infty} (I_N^3) + \epsilon_1 \beta_4 \limsup_{t \rightarrow \infty} (I_T^1) + \epsilon_1 \beta_5 \limsup_{t \rightarrow \infty} (I_T^2) + \epsilon_1 \beta_6 \limsup_{t \rightarrow \infty} (I_T^3) + \\ &\epsilon_1 \epsilon_2 \beta_7 \limsup_{t \rightarrow \infty} (I_\Lambda^1) + \epsilon_1 \epsilon_2 \beta_8 \limsup_{t \rightarrow \infty} (I_\Lambda^2) + \epsilon_1 \epsilon_2 \beta_9 \limsup_{t \rightarrow \infty} (I_\Lambda^3))]. \end{aligned} \tag{4}$$

同理得到:

$$\begin{aligned} \limsup_{t \rightarrow \infty} I_N^2(t) &\leq \frac{\rho_1}{\rho_2 + k_3 + \mu} \limsup_{t \rightarrow \infty} I_N^1(t), \limsup_{t \rightarrow \infty} I_N^3(t) \leq \frac{\rho_2}{m + k_4 + \mu} \limsup_{t \rightarrow \infty} I_N^2(t), \\ \limsup_{t \rightarrow \infty} I_T^1(t) &\leq \frac{k_2}{\rho_1 + \phi_1 + \mu} \limsup_{t \rightarrow \infty} I_N^1(t), \limsup_{t \rightarrow \infty} I_T^2(t) \leq \frac{k_3}{\rho_2 + \tau_2 + \mu} \limsup_{t \rightarrow \infty} I_N^2(t) + \frac{\rho_1}{\rho_2 + \tau_2 + \mu} \limsup_{t \rightarrow \infty} I_T^1(t), \\ \limsup_{t \rightarrow \infty} I_T^3(t) &\leq \frac{k_4}{m + \phi_3 + \mu} \limsup_{t \rightarrow \infty} I_N^3(t) + \frac{\rho_2}{m + \phi_3 + \mu} \limsup_{t \rightarrow \infty} I_T^2(t), \limsup_{t \rightarrow \infty} I_\Lambda^1(t) \leq \frac{\tau_1}{\phi_1 + \mu} \limsup_{t \rightarrow \infty} I_T^1(t), \\ \limsup_{t \rightarrow \infty} I_\Lambda^2(t) &\leq \frac{\tau_2}{\phi_2 + \mu} \limsup_{t \rightarrow \infty} I_T^2(t), \limsup_{t \rightarrow \infty} I_\Lambda^3(t) \leq \frac{\tau_3}{\phi_3 + \mu + m_1} \limsup_{t \rightarrow \infty} I_T^3(t). \end{aligned} \tag{5}$$

整理上式, 得到:

$$\begin{aligned} \limsup_{t \rightarrow \infty} I_N^2(t) &\leq \frac{\rho_1}{\rho_2 + k_3 + \mu} \limsup_{t \rightarrow \infty} I_N^1(t), \limsup_{t \rightarrow \infty} I_N^3(t) \leq \frac{\rho_1 \rho_2}{(k_3 + \rho_2 + \mu)(k_3 + m + \mu)} \limsup_{t \rightarrow \infty} I_N^1(t), \\ \limsup_{t \rightarrow \infty} I_T^1(t) &\leq \frac{k_2}{\rho_1 + \phi_1 + \mu} \limsup_{t \rightarrow \infty} I_N^1(t), \\ \limsup_{t \rightarrow \infty} I_T^2(t) &\leq \frac{\rho_1}{(\tau_2 + \rho_2 + \mu)} \left(\frac{k_2}{\tau_1 + \rho_1 + \mu} + \frac{k_3}{k_3 + \rho_2 + \mu} \right) \limsup_{t \rightarrow \infty} I_N^1(t), \\ \limsup_{t \rightarrow \infty} I_T^3(t) &\leq \frac{\rho_1 \rho_2}{(\tau_3 + m + \mu)} \left[\left(\frac{k_2}{\tau_2 + \rho_1 + \mu} + \frac{k_3}{k_3 + \rho_2 + \mu} \right) \frac{1}{\tau_2 + \rho_2 + \mu} + \frac{k_4}{(k_3 + \rho_2 + \mu)(k_4 + m + \mu)} \right] \limsup_{t \rightarrow \infty} I_N^1(t), \\ \limsup_{t \rightarrow \infty} I_\Lambda^1(t) &\leq \frac{\tau_1 k_2}{(\tau_1 + \rho_1 + \mu)(\phi_1 + \mu)} \limsup_{t \rightarrow \infty} I_N^1(t), \\ \limsup_{t \rightarrow \infty} I_\Lambda^2(t) &\leq \frac{\rho_1 \tau_2}{(\rho_2 + \tau_2 + \mu)(\phi_2 + \mu)} \left(\frac{k_2}{\tau_1 + \rho_1 + \mu} + \frac{k_3}{k_3 + \rho_2 + \mu} \right) \limsup_{t \rightarrow \infty} I_N^1(t), \\ \limsup_{t \rightarrow \infty} I_\Lambda^3(t) &\leq \frac{\rho_1 \rho_2 \tau_3}{(\tau_3 + m + \mu)(\phi_3 + \mu)} \left[\frac{1}{\tau_2 + \rho_2 + \mu} \left(\frac{k_2}{\tau_1 + \rho_1 + \mu} + \frac{k_3}{k_3 + \rho_2 + \mu} \right) + \right. \end{aligned}$$

$$\left. \frac{k_4}{(k_3 + \rho_2\mu)(k_4 + \rho_2 + \mu)} \right] \limsup_{t \rightarrow \infty} I_N^1(t). \tag{6}$$

将(6)式代入(4)式,得

$\limsup_{t \rightarrow \infty} I_N^1(t) \leq P_N(M_1 + M_2 + M_3 + M_4 + M_5 + M_6 + M_7 + M_8 + M_9) \limsup_{t \rightarrow \infty} I_N^1(t) = R_0 \limsup_{t \rightarrow \infty} I_N^1(t)$.
 因此, $R_0 < 1, \limsup_{t \rightarrow \infty} I_N^1(t) < R_0 \limsup_{t \rightarrow \infty} I_N^1(t)$, 则 $\limsup_{t \rightarrow \infty} I_N^1(t) = 0$, 同时 $\limsup_{t \rightarrow \infty} I_N^2(t) = 0, \limsup_{t \rightarrow \infty} I_N^3(t) = 0, \limsup_{t \rightarrow \infty} I_T^1(t) = 0, \limsup_{t \rightarrow \infty} I_T^2(t) = 0, \limsup_{t \rightarrow \infty} I_T^3(t) = 0, \limsup_{t \rightarrow \infty} I_A^1(t) = 0, \limsup_{t \rightarrow \infty} I_A^2(t) = 0, \limsup_{t \rightarrow \infty} I_A^3(t) = 0$. 所以, 当 $R_0 < 1$ 时, 系统(1)无病平衡点全局吸引的.

3 数值模拟

利用遗传算法, 对 2012—2015 年中国 MSM 艾滋病新增病例数^[12] 进行数值拟合, 能够估计出模型中的初值(见表 1)和未知参数(见表 2).

通过模型计算, 在当前措施下(未考虑媒体因子作用), 中国 MSM 人群中每年新增艾滋病感染者数量将持续增加(见图 2). 通过所建立的模型和估计的参数, 计算得出, 到 2016 年在 MSM 群体中将有 36.7% 的感染者还没有做过检测(没做过检测的设为 I_N , 做过检测的设为 I_A 和 I_T , 其中, $I_N = I_N^1 + I_N^2 + I_N^3, I_A = I_A^1 + I_A^2 + I_A^3, I_T = I_T^1 + I_T^2 + I_T^3$). 这部分感染者并没有被疾控或医疗部门所发现, 且其自身也没有进一步的防治意识, 在人群中形成了巨大的艾滋病传播“隐患”(见图 3(a)). 而进一步计算得出 2016 年有 51.3% 的 MSM 新增感染者是被这部分没有被发现的感染者传染的(见图 3(b)).

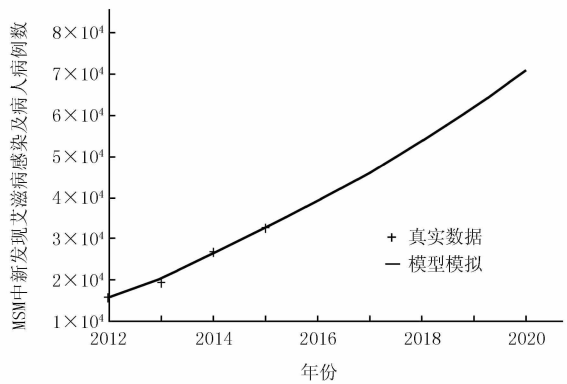


图2 在当前措施下2012—2020年中国MSM艾滋病新增病例数模拟图

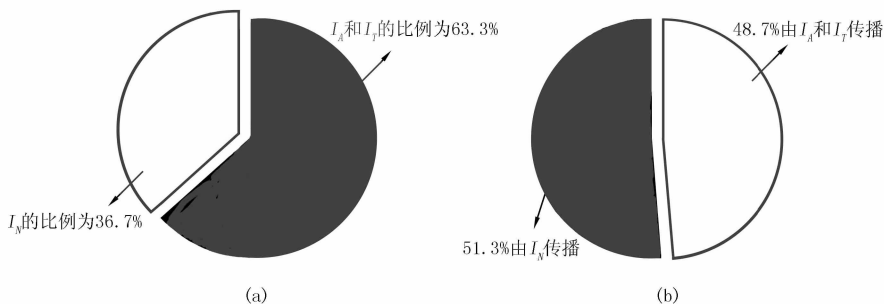


图3 (a)MSM中HIV感染者检测占比图; (b)2016年新增艾滋病感染者传播途径占比图

表 1 模型中所取的初值

仓室	初值(人数)	仓室	初值(人数)	仓室	初值(人数)
S_N	3 000 000	S_T	700 000	I_A^1	24 947
I_N^1	23 337	I_T^1	37 487	I_A^2	36 744
I_N^2	24 965	I_T^2	38 570	I_A^3	19 478
I_N^3	2 983	I_T^3	19 900		

表 2 模型参数说明

参数	数值	来源文献	参数	数值	来源文献
α :MSM 每年输入人口数	50 000	拟合	π_{NR} :未检测的 MSM 与固定性伴安全套的使用率	30.7%	[15-17]
μ :除病程发展因素外的移除率	0.024	[13]	π_{TR} :检测的 MSM 与固定性伴安全套的使用率	31.6%	[15-17]
ρ_1, ρ_2 :未接受 ART 治疗的病程发展率	0.303	[14]	π_{NC} :未检测的 MSM 与非固定性伴安全套的使用率	37.7%	[15-17]
m_1 :治疗阶段因病死亡率	0.5	[6]	π_{TC} :检测的 MSM 与非固定性伴安全套的使用率	41.4%	[15-17]
C_{NR} :未检测的 MSM 与固定性伴每年发生的高危性行为次数	36.5	[15-16,18]	k_1, k_2, k_3, k_4 :检测率	0.09,0.14, 0.44,0.5	拟合
C_{TR} :检测的 MSM 与固定性伴每年发生的高危性行为次数	36.2	[15-17]	τ_1, τ_2, τ_3 :参与治疗率	0.018,0.47, 0.56	拟合
C_{NC} :未检测的 MSM 与非固定性伴每年发生的高危性行为次数	18.2	[15-17]	ϕ_1, ϕ_2, ϕ_3 :治疗失败率	0.024	[7]
C_{TC} :检测的 MSM 与非固定性伴每年发生的高危性行为次数	22.2	[15-17]	m :因病死亡率	0.5	[6]
ϵ_1, ϵ_2 :调整因子	0.54,0.04	拟合	$\beta_1 \sim \beta_0$:每次高危性行为被感染概率	0.003 6,0.005,0.086, 0.003 6,0.005,0.086, 0.003 6,0.005,0.086	拟合

为探究媒体因子对不同干预措施的影响,制定以下 4 种措施进行对比. S_1 :当前干预不变,不加媒体影响; S_2 :媒体因子作用于检测率,通过宣传教育提高检测率为 $g_1(I)k_1, g_1(I)k_2, g_1(I)k_3, g_1(I)k_4$, 其中, k_1, k_2, k_3, k_4 表示不同感染阶段时的检测率; S_3 :媒体因子作用于参与治疗率,通过宣传教育提高参与治疗率为 $g_2(I)\tau_1, g_2(I)\tau_2, g_2(I)\tau_3$, 其中, τ_1, τ_2, τ_3 表示不同感染阶段时的治疗率; S_4 :媒体因子作用于安全套使用率,通过宣传教育提高安全套使用率为 $g_3(I)\pi_{NC}, g_3(I)\pi_{TC}, g_3(I)\pi_{TR}, g_3(I)\pi_{NR}$.

取媒体影响因子 $a_1 = a_2 = a_3 = 0.5, b_1 = b_2 = b_3 = 1000$, 数值仿真结果显示 S_4 措施的效果明显好于其他措施(见图 4). 由此得知,宣传安全套使用这个干预措施将更加有效. 图 5 中,进一步得到在 MSM 固定性伴中提高安全套使用率对抑制艾滋病传播的效果更加明显. 首先,当固定性伴安全套使用率 π_{TR}, π_{NR} 保持不变,非固定性伴的安全套使用率 π_{TC}, π_{NC} 各从 40% 增加到 100% 时,基本再生数 R_0 仅从 4.59 降到 3.09 (见图 5(a)); 而当与非固定性伴安全套使用率 π_{TC}, π_{NC} 保持不变,固定性伴的安全套使用率 π_{TR}, π_{NR} 各从 40% 增加到 100% 时,基本再生数 R_0 会从 4.19 降到 1.5(见图 5(b)), 提高与固定性伴的安全套使用率会更大幅度降低 R_0 .

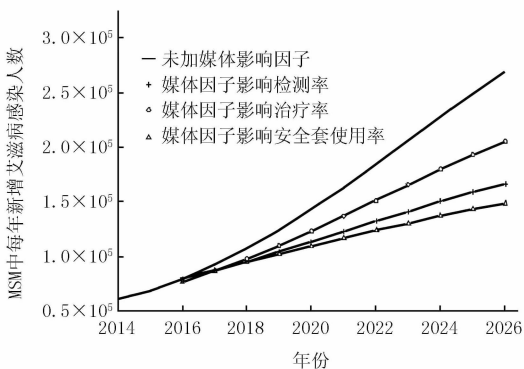


图4 不同媒体宣传干预的效果

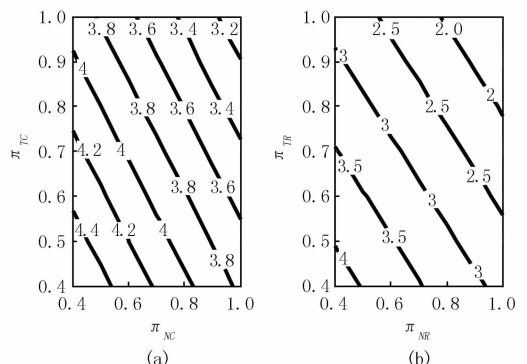


图5 (a)非固定性伴的安全套使用率与 R_0 的等高线图; (b)固定性伴的安全套使用率与 R_0 的等高线图

同时,分析了当 MSM 非固定性伴和固定性伴安全套使用率共同变化对基本再生数 R_0 的影响(见图 6),可以得到 $R_0 < 1$ 时安全套使用率范围. 在 $R_0 < 1$ 区域中,选取两点作为 2016 年之后固定性伴与非固定性伴安全套使用率,得到在此条件下,每年 MSM 中新增 HIV 感染者数量的变化(见图 7). 若 2016 年之后与固定性伴安全套使用率达到 87.5%,与非固定性伴安全套使用率达到 82.5%时,到 2018 每年 MSM 中 HIV 新增感染者将会逐年下降.

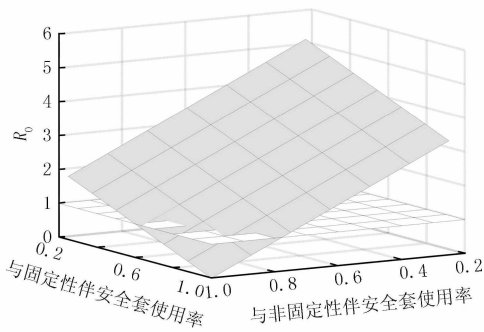


图6 安全套使用率与 R_0 的关系

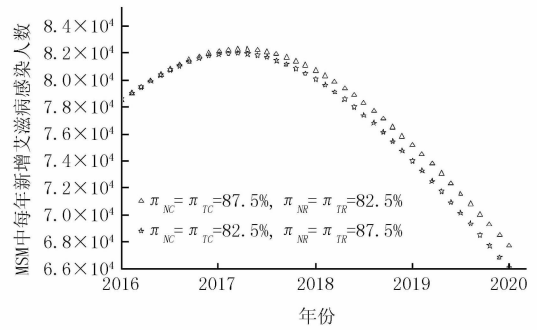


图7 不同安全套使用率对MSM中新增艾滋病感染人数的影响

4 结论

本文建立了一类具有媒体效应的 MSM 群体艾滋病传播模型,这类模型很好地拟合了 2012—2015 年中国 MSM 新增病例数据,能够在一定程度上反映艾滋病在 MSM 人群中的传播机理. 利用估计得到的参数计算在当前措施下,基本再生数 $R_0 = 4.59 > 1$,这说明中国 MSM 人群中新增艾滋病感染者未来将持续存在.

值得注意的是,图 2 中‘+’表示疾控或医疗部门每年发现的艾滋病感染者及病人的病例数,但仍有一部分感染者并没有被发现 (I_N^1, I_N^2, I_N^3). 本文通过模型算得 MSM 人群中未发现的 HIV 感染者比例为 36.7%,高于中国整体艾滋病未发现比例 32%^[19],这可能因为中国 MSM 人群较其他人群更加隐蔽,发现更加困难. 此外,通过模型还计算出 2016 年新增感染者中有 51.3%是被这些没有被发现的感染者所传染. 这些未被发现的感染者一方面没得到及时有效的治疗,另一方面由于不清楚自己的感染情况,会传染更多的易感者.

通过数值仿真,模拟媒体因子作用于 3 种不同干预措施,得到媒体加强宣传安全套使用所产生的效果明显好于宣传其他干预措施. 而提高固定性伴安全套使用率对基本再生数 R_0 的影响更大,说明加强宣传固定性伴对安全套的使用对于控制艾滋病的蔓延更加有效.

综上所述,疾控部门在利用新媒体平台进行宣传教育时,应结合多种干预措施,并重点强调安全套的使用,以此抑制艾滋病在 MSM 群体中的进一步蔓延. 提高 MSM 人群中安全套的使用率,特别是与固定性伴安全套的使用,能够更有效地预防艾滋病. 在 MSM 性行为的发生过程中,不能因为其与固定性伴的信任而忽略安全套的使用,否则将增加艾滋病的患病风险. 此外,还应进一步加大 MSM 人群的 HIV 检测率,让更多 MSM 知道自身的感染情况,并通过媒体干预等措施,降低其传播疾病的风险.

参 考 文 献

- [1] 中华人民共和国卫生部,联合国艾滋病规划署,世界卫生组织. 2011 年中国艾滋病疫情估计[J]. 中国艾滋病性病, 2012(1):1-5.
- [2] 北京市疾病预防控制中心. 2016 年艾滋病疫情通报[EB/OL]. (2016-12-01)[2016-12-10]. <http://www.bjcdc.org/article/43037/2016/12/1480574106480.html>.
- [3] 南昌市疾病预防控制中心. 2016 年艾滋病疫情通报[EB/OL]. (2016-09-20)[2016-12-10]. <http://mt.sohu.com/20160920/n468801807.shtml>.
- [4] 张根福,吴维. 交往方式与择偶标准一项基于 J 市男同性恋的实证研究[J]. 浙江师范大学学报(社会科学版), 2014, 39(6):67-74.
- [5] 淡蓝网. Blue 数据:用户逾 2200 万人,数百万日活用户[EB/OL]. (2016-01-13)[2016-12-01]. http://www.danlan.org/disparticle_52645.htm.
- [6] Luo S T, Han L T, Lu H Y. Evaluating the impact of Test-and-Treat on the HIV epidemic among MSM in china using a mathematical

- model[J]. PLoS ONE, 2015, 10: 1-14.
- [7] Lou J, Blevins M, Ruan Y II. Modeling the impact on HIV incidence of combination prevention strategies among men who have sex with men in Beijing, China[J]. PLoS ONE, 2014, 9: 1-8.
- [8] Cui J A, Tao X, Zhu H P. An SIS infection model incorporating media coverage[J]. Rocky Mountain Journal of Mathematics, 2008, 38: 1323-1336.
- [9] Chow E P, Wilson D P, Zhang L. Patterns of condom use among men who have sex with men in China: a systematic review and meta-analysis[J]. AIDS and Behavior, 2012, 16: 635-663.
- [10] 周振海, 李书明, 刘英杰. 北京市男男性行为者行为因素和心理状态与 HIV 感染状态的研究[J]. 中华流行病学杂志, 2010, 31: 273-276.
- [11] van den D P, Watmough J. Reproduction numbers and sub-threshold endemic equilibria for compartmental models of disease transmission[J]. Mathematical Bioscience, 2001, 180: 29-48.
- [12] 中国疾病预防控制中心, 性病艾滋病预防控制中心, 性病控制中心. 2014 年 12 月全国艾滋病性病疫情及主要防治工作进展[J]. 中国艾滋病性病, 2015(2): 87-88.
- [13] Lima V D, Johnston K, Hogg R S. Expanded access to highly active antiretroviral therapy: a potentially powerful strategy to curb the growth of the HIV epidemic[J]. J Infect Dis, 2008, 198: 59-67.
- [14] Granich R M, Gillks C F, Dye C, et al. Universal voluntary HIV testing with immediate antiretroviral therapy as a strategy for elimination of HIV transmission: a mathematical model[J]. Lancet, 2009, 373: 48-57.
- [15] Cremin I, Alsallaq R, Dybul M. The new role of antiretrovirals in combination HIV prevention: a mathematical modeling analysis[J]. Aids, 2013, 27: 447-458.
- [16] Wu Z Y, Sullivan S G, Rotheram-Borus M J. Evolution of China's response to HIV/AIDS[J]. Lancet, 2007, 369(9562): 679-690.
- [17] 与明润, 李书明, 闰莉, 等. 北京市 MSM 人群抗体检测及影响因素分析[J]. 中国公共卫生, 2010, 10: 1234-1236.
- [18] Ruan Y II, Luo F J, Yu J. Risk factors for syphilis and prevalence of HIV, hepatitis B and C among men who have sex with men in Beijing, China: implication for HIV prevention[J]. AIDS Behav, 2009, 13: 663-670.
- [19] 新华网. 中国每万人中 6 人感染艾滋仍有 3 成感染者未被发现[EB/OL]. (2016-10-30)[2016-12-01]. <http://news.china.com/domestic/945/20161030/23829824.html>.

An AIDS Transmission Model Among MSM Under Media Coverage

CUI Jingan, FAN Shengjie, CHEN Fangyuan

(School of Science, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 102616, China)

Abstract: In new media age, propaganda and education strategies play an important role in the spread of AIDS among MSM (men who have sex with men). In this paper, it is established a HIV epidemic model with media factors, in order to study the important of propaganda and education. By analyzing the HIV transmission model, it is calculated that the basic reproduction number is $R_0 = 4.59$ among MSM without media intervention. Comparing different propaganda strategies, it is found that promoting the use of condom is more effective than other publicity strategies and increasing the use of condom with regular partners has greater impact on the basic reproduction number R_0 . At the same time, it is concluded that 36.7% of MSM infected people are not found and 51.3% of new infections are transmitted by these unfound infections. Strength propaganda and education strategies can effectively control the spread of HIV among MSM under new media era.

Keywords: MSM; AIDS; mathematical model

[责任编辑 陈留院]