

# 弓形虫传播模型的稳定性分析

任丽霞, 薛亚奎

(中北大学理学院, 山西太原 030051)

**摘要:**为了研究控制弓形虫病传播的临界值,对疾病进行有效预防,并进行相关的理论分析与研究,针对弓形虫的生活史以及传播途径建立数学模型,分析得到了决定疾病是否继续存在以及传播的基本再生数,当基本再生数小于 1 时,疾病将逐渐消亡,最终灭绝,当基本再生数大于 1 时,模型存在唯一的地方病平衡点,此时疾病将一直持续下去,形成地方病。通过建立合适的 Lyapunov 函数等方法,给出了无病平衡点和地方病平衡点全局渐近稳定的充分条件,同时对建立的数学模型进行了系统、完整的定性和稳定性研究。研究结果对后续弓形虫病的研究及其数学模型的建立有一定的借鉴意义。

**关键词:**稳定性理论;弓形虫;最终宿主;基本再生数;全局稳定性;Lyapunov 函数

中图分类号:O175

MSC(2010)主题分类:34D20

文献标志码:A

## Stability analysis of *Toxoplasma gondii* propagation model

REN Lixia, XUE Yakui

(School of Science, North University of China, Taiyuan, Shanxi 030051, China)

**Abstract:** *Toxoplasma gondii* as a typical zoonotic disease, because there is no suitable vaccine, its control is important in prevention, so it has been the subject of research by all scholars. In order to study the critical value of controlling its transmission and carry out relevant theoretical analysis, This paper establishes a mathematical model based on the life history and transmission route of *Toxoplasma gondii*, and analyzes the basic regeneration number that determines whether the disease continues to exist. When the basic reproduction number is less than 1, the disease died out finally. When the basic reproduction number is greater than 1, the model had a unique endemic equilibrium point, and the disease uniformly persisted. In addition, the sufficient conditions for the global asymptotic stability of the disease-free equilibrium and the endemic equilibrium are given by establishing a suitable Lyapunov function. In this paper, a systematic and complete stability study of the established mathematical model can be provided to provide advice for controlling the spread of disease.

**Keywords:** theory of stability; *Toxoplasma gondii*; final host; basic reproduction number; global stability; Lyapunov function

弓形虫病是由一种刚地弓形虫(*Toxoplasma gondii*)引起的人畜共患病<sup>[1-6]</sup>。猫和其他猫科动物是弓形虫的最终宿主<sup>[2]</sup>,它寄生在这些动物的小肠上皮细胞内,形成囊合子随粪便排出,其他哺乳类动物和鸟吃到

收稿日期:2018-09-08;修回日期:2018-10-09;责任编辑:张 军

基金项目:国家自然科学基金(11201434);山西省自然科学基金(2015022009)

第一作者简介:任丽霞(1992—),女,山西大同人,硕士研究生,主要从生物数学方面的研究。

通信作者:薛亚奎教授。E-mail:3024664346@qq.com

任丽霞,薛亚奎.弓形虫传播模型的稳定性分析[J].河北科技大学学报,2018,39(6):511-517.

REN Lixia, XUE Yakui. Stability analysis of *Toxoplasma gondii* propagation model[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2018, 39(6): 511-517.

体内发生感染,在它们组织内发育成为包囊,囊合子和包囊是弓形虫的不同发育阶段。除了终宿主以外,在其他动物体内只能进行无性繁殖,不能向外界散播它的后代。

弓形虫病病情轻重不一,免疫功能正常的宿主表现急性淋巴结炎的较为多见,免疫缺损者,如艾滋病、器官移植、恶性肿瘤(主要为霍杰金病等)常有显著的全身症状,如高热、肌痛,并发生脑炎、胃肠炎等<sup>[7-10]</sup>。

弓形虫多藏在被猫狗粪便污染的土壤中,生的、半生不熟的家禽类肉食中,未经消毒的羊奶中,没洗干净和未经过烹饪的蔬菜水果中,人类作为弓形虫病传播过程中的中间宿主,感染弓形虫病的几率是非常大的,尤其猫作为宠物被越来越多的人饲养,使得人感染弓形虫病的病例在逐年上升。弓形虫病分先天性和获得性2类,先天性弓形虫病只发生于初孕妇女<sup>[11-12]</sup>,经胎盘血流传播,受染胎儿多数表现为隐性感染,也可造成孕妇流产、畸胎或死产,尤以早孕期感染而引起的畸胎发生率高<sup>[13-14]</sup>。研究表明,婴儿出生时出现症状或发生畸形者病死率为12%,而存活下来的80%有精神发育障碍,50%有视力障碍<sup>[15-16]</sup>。

## 1 模型介绍

根据弓形虫的生活史以及传播途径,建立如下的数学模型:

$$\begin{cases} \frac{dS}{dt} = A_1 - (1-q)\beta_1 ES - d_1 S, \\ \frac{dI}{dt} = (1-q)\beta_1 ES - \delta I - d_1 I, \\ \frac{dR}{dt} = \delta I - d_1 R, \\ \frac{dM_s}{dt} = A_2 - \beta_2 EM_s - d_2 M_s, \\ \frac{dM_i}{dt} = \beta_2 EM_s - d_2 M_i, \\ \frac{dC_s}{dt} = A_3 - \beta_3 \epsilon M_i C_s + r C_i - d_3 C_s, \\ \frac{dC_i}{dt} = \beta_3 \epsilon M_i C_s - r C_i - d_3 C_i, \\ \frac{dE}{dt} = m C_i - d_4 E, \end{cases} \quad (1)$$

式中: $S, I$  以及  $R$  分别表示人群中的易感者、染病者以及免疫者在  $t$  时刻的数量; $M_s$  和  $M_i$  分别表示中间宿主中的易感者和染病者在  $t$  时刻的数量; $C_s$  和  $C_i$  分别表示最终宿主(猫)中的易感者和染病者在  $t$  时刻的数量; $E$  指的是环境中  $t$  时刻的虫卵密度,由最终宿主释放到环境中的虫卵以及虫卵的死亡率决定; $A_i (i=1, 2, 3)$  和  $d_i (i=1, 2, 3)$  分别表示人群、中间宿主以及最终宿主的输入率和死亡率; $\delta$  和  $r$  分别表示人群和最终宿主的治愈率; $q$  表示宣传措施的影响力系数,是中间宿主中可以传染给最终宿主的比例(猫吃掉老鼠、松鼠等小动物感染弓形虫); $m$  指最终宿主弓形虫的释放率。

## 2 基本再生数以及平衡点的存在性

在这一部分,给出模型(1)的基本再生数,并证明无病平衡点  $E^0$  和地方病平衡点  $E^*$  的存在性。

### 2.1 基本再生数和无病平衡点的存在性

根据模型(1),有: $\frac{d(S+I+R)}{dt} = A_1 - d_1(S+I+R)$ ,当  $t \rightarrow \infty$  时,  $\lim_{t \rightarrow \infty} (S+I+R) \leq \frac{A_1}{d_1}$ ,求得可行域:

$$D = \{(S, I, R, M_s, M_i, C_s, C_i, E) \in \mathbb{R}_+^8 : S+I+R \leq \frac{A_1}{d_1}, M_s+M_i \leq \frac{A_2}{d_2}, C_s+C_i \leq \frac{A_3}{d_3}, E \leq \frac{mA_3}{d_3 d_4}\},$$

集合  $D$  是一个正不变集,是模型(1)的一个全局吸引子。

模型(1)的无病平衡点为  $E^0 = (S^0, 0, 0, M_s^0, 0, C_s^0, 0, 0)$ ,其中  $S^0 = \frac{A_1}{d_1}, M_s^0 = \frac{A_2}{d_2}, C_s^0 = \frac{A_3}{d_3}$ 。

由模型(1)知,存在感染的仓室有 $(I, I_i, C_i, E)$ ,根据下一代矩阵法<sup>[17-18]</sup>有:

$$F = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & (1-q)\beta_1 S^0 \\ 0 & 0 & 0 & \beta_2 M_s^0 \\ 0 & \beta_3 \epsilon C_s^0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m & 0 \end{bmatrix}, \quad V = \begin{bmatrix} \delta + d_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & d_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r + d_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_4 \end{bmatrix},$$

$$FV^{-1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \frac{(1-q)\beta_1 A_1}{d_1 d_4} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{\beta_2 A_2}{d_2 d_4} \\ 0 & \frac{\epsilon \beta_3 A_3}{d_2 d_3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{m}{r + d_3} & 0 \end{bmatrix},$$

求得基本再生数:

$$R_0 = \sqrt[3]{\frac{m \epsilon A_2 A_3 \beta_2 \beta_3}{d_2^2 (r + d_3) d_3 d_4}} \quad (2)$$

### 2.2 地方病平衡点的存在性

通过对模型(2)的分析发现,后面 5 个方程不受前 3 个方程的影响,所以可以将模型(1)分成 2 个子模型:

$$\begin{cases} \frac{dS}{dt} = A_1 - (1-q)\beta_1 ES - d_1 S, \\ \frac{dI}{dt} = (1-q)\beta_1 ES - \delta I - d_1 I, \\ \frac{dR}{dt} = \delta I - d_1 R, \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \frac{dM_s}{dt} = A_2 - \beta_2 EM_s - d_2 M, \\ \frac{dM_i}{dt} = \beta_2 EM_s - d_2 M_i, \\ \frac{dC_s}{dt} = A_3 - \beta_3 \epsilon M_i C_s + r C_i - d_3 C_s, \\ \frac{dC_i}{dt} = \beta_3 \epsilon M_i C_s + r C_i - d_3 C_i, \\ \frac{dE}{dt} = m C_i - d_4 E, \end{cases} \quad (4)$$

令模型(3)中的方程右面均等于 0,可以将其简化为

$$a_1 C_i^2 + a_2 C_i = 0, \quad (5)$$

式中: $a_1 = -[\beta_2 \beta_3 \epsilon m A_2 A_3 + \beta_2 m d_3 d_2 (d_3 + r)]$ ;  $a_2 = [\beta_2 \beta_3 m \epsilon A_2 A_3 - d_2^2 d_3 d_4 (d_3 + r)]$ 。

根据二次函数的性质对方程(4)进行分析,该方程有 2 个不相等的实数解且其中 1 个为 0,当  $R_0 > 1$  时,另外 1 个解为正解,即:

$$M_s^* = \frac{A_2}{d_2} - M_i^*, \quad M_i^* = \frac{d_3 (d_3 + r) C_i^*}{\beta_3 \epsilon (A_3 - d_3 C_i^*)}, \quad C_s^* = \frac{A_3}{d_3} - C_i^*, \quad C_i^* = \frac{[\beta_2 \beta_3 m \epsilon A_2 A_3 - d_2^2 d_3 d_4 (d_3 + r)]}{[\beta_2 \beta_3 m \epsilon A_2 d_3 + \beta_2 m d_3 d_2 (d_3 + r)]},$$

$$E^* = \frac{m}{d_4} - C_i^*。$$

令子模型(3)的方程右面均等于0,将 $E^*$ 代入求得:

$$S^* = \frac{A_1}{(1-q)\beta_1 E^* + d_1}, \quad I^* = \frac{(1-q)\beta_1 E^* S^*}{\delta + d}, \quad R^* = \frac{(1-q)\beta_1 \delta E^* S^*}{d_1(\delta + d_1)},$$

所以,当 $R_0 > 1$ 时,模型(1)将有唯一的地方病平衡点, $E^* = (S^*, I^*, R^*, M_s^*, M_i^*, C_s^*, C_i^*, E^*)$ ,对模型(1)的平衡点的存在性结论进行总结,得到以下定理。

**定理 1** 模型(1)一定含有一个无病平衡点 $E^0$ ,当 $R_0 > 1$ 时,有唯一的地方病平衡点 $E^*$ 。

### 3 全局渐近稳定性

在这一部分,对无病平衡点 $E^0$ 以及地方病平衡点 $E^*$ 的全局渐近稳定性进行分析。

#### 3.1 无病平衡点的全局渐近稳定性

**定理 2** 当 $R_0 < 1$ 时,无病平衡点 $E^0$ 是局部渐近稳定的,当 $R_0 > 1$ 时,无病平衡点 $E^0$ 是不稳定的。

**证明** 模型(1)在无病平衡点 $E^0$ 的 Jacobian 矩阵为

$$J(E^0) = \begin{pmatrix} -d_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{(1-q)\beta_1 A_1}{d_1} \\ 0 & -(\delta + d_1) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{(1-q)\beta_1 A_1}{d_1} \\ 0 & \delta & -d_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -d_2 & 0 & 0 & 0 & -\frac{\beta_2 A_2}{d_2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -d_2 & 0 & 0 & \frac{\beta_2 A_2}{d_2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{\beta_3 \epsilon A_3}{d_3} & -d_3 & r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\beta_3 \epsilon A_3}{d_3} & 0 & -(r + d_3) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m & -d_4 \end{pmatrix},$$

该矩阵的特征多项式为

$$\phi(\lambda) = (\lambda + d_1)^2 (\lambda + \delta + d_1) (\lambda + d_2) (\lambda + d_3) \left[ (\lambda + d_2) (\lambda + r + d_3) (\lambda + d_4) - \frac{\beta_2 \beta_3 \epsilon m A_2 A_3}{d_2 d_3} \right],$$

简化得:

$$\phi(\lambda) = (\lambda + d_1)^2 (\lambda + \delta + d_1) (\lambda + d_2) (\lambda + d_3) (\lambda^3 + b_1 \lambda + b_2 \lambda + b_3),$$

式中:

$$\begin{cases} b_1 = r + d_2 + d_3 + d_4, \\ b_2 = d_2 r + d_2 d_3 + r d_4 + d_2 d_4 + d_3 d_4, \\ b_3 = d_2 d_4 r + d_2 d_3 d_4 - \frac{\beta_2 \beta_3 \epsilon A_2 A_3 m}{d_2 d_3} = d_2 d_4 (r + d_3) (1 - R_0^3), \end{cases} \quad (6)$$

当 $R_0 < 1$ 时,有 $H_1 = b_1 > 0$ , $H_2 = b_1 b_2 - b_3 > 0$ , $H_3 = b_3 H_2 > 0$ ,由 ROUTH-HERWITZ 判据可知, $\phi(\lambda)$ 的所有根都有负实部,无病平衡点 $E^0$ 是局部渐近稳定的,当 $R_0 > 1$ 时, $\phi(\lambda)$ 的根的实部不全为负,这时无病平衡点 $E^0$ 是不稳定的。

**定理 3** 当 $R_0 < 1$ 时,模型(1)的无病平衡点 $E^0$ 是全局渐近稳定的。

**证明** 对于子模型(4)来说,该模型所有初值属于可行域 $D$ 的解: $(M_s, M_i, C_s, C_i, E)$ 都在可行域 $D$ 中,

对于  $\forall t \geq 0$ , 有:  $M_s \leq \frac{A_2}{d_2}, C_s \leq \frac{A_3}{d_3}$ , 建立 Lyapunov 函数:

$$V(t) = d_4 M_i + \frac{\beta_2 A_2 m}{d_2(r+d_3)} C_i + \frac{\beta_2 A_2}{d_2} E,$$

求导得:

$$\begin{aligned} V'(t) &= d_4 \beta_2 E M_s - d_2 d_4 M_i + \frac{\epsilon \beta_2 \beta_3 A_2 m M_i C_s}{d_2(r+d_3)} - \frac{\beta_2 A_2 m C_i}{d_2} + \frac{\beta_2 A_2 m C_i}{d_2} - \frac{\beta_2 A_2 d_4 E}{d_2} \leq \\ &= \frac{d_4 \beta_2 A_2 E}{d_2} - d_2 d_4 M_i + \frac{\epsilon m \beta_2 \beta_3 A_2 A_3 M_i}{d_2 d_3 (r+d_3)} - \frac{\beta_2 A_2 d_4 E}{d_2} = \\ &= \left( \frac{\epsilon m \beta_2 \beta_3 A_2 A_3}{d_2 d_3 (r+d_3)} - d_2 d_4 \right) M_i = d_2 d_4 (R_0^3 - 1) M_i. \end{aligned}$$

当  $R_0 < 1$  时,  $dV/dt \leq 0$ , 当且仅当  $M_i = 0$  时,  $dV/dt = 0$ . 所以,  $(M_s^0, 0, C_s^0, 0, 0)$  是模型(4)唯一的不变集, 由 LaSalle's 不变集原理知,  $(M_s^0, 0, C_s^0, 0, 0)$  是全局渐近稳定的。

下面分析子模型(3), 因为当  $t \rightarrow \infty$  时,  $E(t) \rightarrow 0$ , 所以当  $t \rightarrow \infty$  时,  $S(t) \rightarrow \frac{A_1}{d_1}, I(t) \rightarrow 0, R(t) \rightarrow 0$ , 所以  $(\frac{A_1}{d_1}, 0, 0)$  对模型(3)来说是吸引的, 根据渐近自治系统理论<sup>[19-20]</sup>, 定义如下。

**定义 1** 若方程的零解是稳定的, 又是吸引的, 则称方程的零解是渐近稳定的; 若方程的零解的吸引域是整个可行域, 则称方程是全局渐近稳定的。

所以, 当  $R_0 < 1$  时, 模型(1)的无病平衡点  $E^0$  在可行域上全局渐近稳定的。

### 3.2 地方病平衡点的全局渐近稳定性

**定理 4** 如果  $R_0 > 1$ , 唯一的地方病平衡点  $E^*$  是全局渐近稳定的。

**证明** 首先对模型(4)的地方病平衡点的全局渐近稳定性加以验证。

当  $t \rightarrow \infty$  时, 有  $M_s(t) + M_i(t) \rightarrow \frac{A_2}{d_2}, C_s(t) + C_i(t) \rightarrow \frac{A_3}{d_3}$ 。

当  $R_0 > 1$ , 将  $M_s^*, C_s^*$  代入模型(4)得:

$$\begin{cases} \frac{dM_i}{dt} = \beta_2 E \left( \frac{A_2}{d_2} - M_i \right) - d_2 M_i, \\ \frac{dC_i}{dt} = \beta_3 \epsilon M_i \left( \frac{A_3}{d_3} - C_i \right) - d_3 C_i - r C_i, \\ \frac{dE}{dt} = m C_i - d_4 E, \end{cases} \quad (7)$$

将模型(7)限制在区域  $\Omega$  中进行研究,  $\Omega = \{ (M_i, C_i, E) \in R_+^3, M_i \leq \frac{A_2}{d_2}, C_i \leq \frac{A_3}{d_3}, E \leq \frac{m A_3}{d_3 d_4} \}$ 。

下面对模型(7)的全局渐近稳定性进行分析。

首先定义:

$$f(u) = \begin{pmatrix} f_1(u_1, u_2, u_3) \\ f_2(u_1, u_2, u_3) \\ f_3(u_1, u_2, u_3) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \beta_2 u_3 \left( \frac{A_2}{d_2} - u_1 \right) - d_2 u_1 \\ \beta_3 \epsilon u_1 \left( \frac{A_3}{d_3} - u_2 \right) - d_3 u_2 - r u_2 \\ m u_2 - d_4 u_3 \end{pmatrix},$$

该映射满足以下条件:

- 1)  $f: R_+^3 \rightarrow R_+^3$  是一个连续可微映射,  $f(0) = 0$ , 当  $u_i = 0, i = 1, 2, 3$  时, 对  $\forall u \in \Omega, f_i(u) \geq 0$ 。
- 2) 因为  $\partial f_i / \partial u_j \geq 0, i \neq j, u \in \Omega$ , 所以  $f$  在  $\Omega$  上单调递增。

3)对  $\forall k \in (0, 1)$ , 有:

$$f_1(ku_1, ku_2, ku_3, ku_4) = \beta_2 ku_3 \left( \frac{A_2}{d_2} - ku_1 \right) - d_2 ku_1 \geq \beta_2 \left( \frac{A_2}{d_2} - u_1 \right) ku_3 - d_2 ku_1 = kf_1(u_1, u_2, u_3, u_4).$$

用类似的方法可以证明  $f_i(ku_1, ku_2, ku_3) \geq kf_i(u_1, u_2, u_3)$ ,  $i=2, 3$ , 所以,  $f$  在区域  $\Omega$  上是严格次线性的。

4)对  $f$  求导得:

$$Df(u) = \begin{pmatrix} -\beta_2 u_3 - d_2 & 0 & \frac{A_2}{d_2} \beta_2 - \beta_2 u_1 \\ \beta_3 \epsilon \frac{A_3}{d_3} - \beta_3 \epsilon u_2 & -\beta_3 \epsilon u_1 - d_3 - r & 0 \\ 0 & m & -d_3 \end{pmatrix}, |Df(u)| \neq 0,$$

矩阵  $Df(u)$  所对应的有向图是强连通的, 所以  $Df(u)$  是不可约的。

$$\text{因为 } Df(0) = \begin{pmatrix} -d_2 & 0 & \frac{A_2}{d_2} \beta_2 \\ \beta_3 \epsilon \frac{A_3}{d_3} & -d_3 - r & 0 \\ 0 & m & -d_4 \end{pmatrix}, Df(0) \text{ 的特征多项式为 } \phi(\lambda) = \lambda^3 + b_1 \lambda^2 + b_2 \lambda + b_3,$$

$b_1, b_2, b_3$  均在式(6)中定义。当  $R_0 > 1$  时, 因为  $b_3 < 0$ , 所以,  $s(Df(0)) = \max\{\text{Re } \lambda; \phi(\lambda)\} > 0$ 。由推论 3.2<sup>[21]</sup>可知, 模型(7)的平衡点  $(M_i^*, C_i^*, E^*)$  是全局渐近稳定的, 用类似的方法也可证明模型(1)的地方病平衡点  $E^*$  全局渐近稳定的。

## 4 结 语

弓形虫病包括先天的和后天的 2 种类型, 笔者主要研究了弓形虫病传播的数学模型, 得到了基本再生数以及平衡点全局渐近稳定的充分条件。当  $R_0 < 1$  时, 疾病最终灭绝, 当  $R_0 > 1$  时, 疾病将持续下去。本文在证明地方病平衡点稳定性时, 不再局限于构造 Lyapunov 函数, 而是通过研究其极限系统的方法得出结论, 对于该病存在垂直传染的数学模型还在探讨之中。现在社会上流浪猫的数量不断增加, 将最终宿主分成家养猫和流浪猫建立新的数学模型, 研究流浪猫的数量变化对弓形虫病传播的影响将是一个新的突破, 有待于进一步研究。

## 参考文献/References:

- [1] 阮秀花, 范振远, 王文辉, 等. 弓形虫病 120 例分析[J]. 中国误诊学杂志, 2005, 5(13): 2527.
- [2] 陈西岐, 刘秀兰, 贺晓璐, 等. 猫弓形虫病[J]. 动物保健, 2007(1): 53.
- [3] COOK A J, GILBERT R E, BUFOLANO W, et al. DunnSources of toxoplasma infection in pregnant women: European multicentre case-control study[J]. European Research Network on Congenital Toxoplasmosis BMJ, 2000, 21: 142-147.
- [4] BOOTHROYD J C, BLACK M, BONNEFOY S, et al. Genetic and biochemical analysis of development in *Toxoplasma gondii*[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B-Biological, 1997, 352(1359): 1347-1354.
- [5] AL-ANOUTI F, QUACH T, ANANVORANICH S. Double-stranded RNA can mediate the suppression of uracil phosphoribosyltransferase expression in *Toxoplasma gondii*[J]. Biochemical and Biophysical Research Communications, 2003, 302(2): 316-323.
- [6] KISSINGER J C, GAJRIA B, LI L, et al. ToxoDB: Accessing the *Toxoplasma gondii* genome[J]. Nucleic Acids Research, 2003, 31(1): 234-236.
- [7] 李祥瑞. 弓形虫病的流行的新趋势[J]. 动物医学进展, 2010, 31(1): 234.  
LI Xiangrui. New Epidemiological characteristics of *Toxoplasma gondii* infections[J]. Progress in Veterinary Medicine, 2010, 31(1): 234.
- [8] 王瑞兰, 黄卫, 许建宁, 等. 以发热为首发症的弓形虫病 22 例报告[J]. 江西医学院学报, 2002, 42(2): 125.
- [9] ELMORE S A, JONES J L, CONRAD P A, et al. *Toxoplasma gondii*: Epidemiology, feline clinical aspects, and prevention[J]. Trends in Parasitology, 2010, 26(4): 190-196.
- [10] KYAN H, TAIRA M, YAMAMOTO A, et al. Isolation and characterization of *Toxoplasma gondii* genotypes from goats at an abattoir

- in Okinawa[J]. *Japanese Journal of Infectious Diseases*, 2012, 65(2): 167-170.
- [11] 王津, 杨际春, 丁晓萍. 弓形虫感染孕妇与不良妊娠结局关系[J]. *沈阳医学院学报*, 2011, 13(2): 81-83.
- [12] 许倩, 华海涌. 弓形虫既往感染在孕期内对胎儿的影响[J]. *中国血吸虫病防治杂志*, 2010, 22(2): 187-188.  
XU Qian, HUA Haiyong. Impact of past *Toxoplasma gondii* infection on the fetus during pregnancy[J]. *Chinese Journal of Schistosomiasis Control*, 2010, 22(2): 187-188.
- [13] MATTOS C C B D, SIQUEIRA R C, FREDERICO F B, et al. Toxoplasmic retinochoroiditis caused by *Toxoplasma gondii* strain TOXODB# 65[J]. *Acta Tropica*, 2018, 185: 419-421.
- [14] LOUASSINI M, FOULQUIE M, BENITEZ R, et al. Citric-acid cycle key enzyme activities during in vitro growth and metacyclogenesis of *Leishmania infantum* promastigotes[J]. *The Journal of Parasitology*, 1999, 85(4): 595-602.
- [15] VERLINDE C L, HANNAERT V, BLONSKI C, et al. Glycolysis as a target for the design of new anti-trypanosome drugs[J]. *Drug Resistance Updates*, 2001, 4(1): 50-65.
- [16] TAYLOR M A, WEBSTER K A. Recent advances in the diagnosis in livestock of *Cryptosporidium*, *Toxoplasma*, *Giardia* and other protozoa of veterinary importance[J]. *Research in Veterinary Science*, 1998, 65(3): 183-193.
- [17] DRIESSCHE P V D, WATMOUGH J. Reproduction numbers and sub-threshold endemic equilibria for compartmental models of disease transmission[J]. *Mathematical Biosciences*, 2002, 180(1/2): 29-48.
- [18] 闫卫平, 吴素赞. 带有治疗项的 SIS 反应扩散传染病模型动力学分析[J]. *河北科技大学学报*, 2015, 36(6): 587-592.  
YAN Weiping, WU Suyun. A dynamics analysis of an SIS epidemic reaction-diffusion model with treatment[J]. *Journal of Hebei University of Science and Technology*, 2015, 36(6): 587-592.
- [19] MARKUS L. Asymptotically autonomous differential systems[J]. *Annals of Mathematics Studies*, 1956, 36(6): 17-29.
- [20] THIEME H R. Convergence results and a Poincar'e-Bendixson trichotomy for asymptotically autonomous differential equations[J]. *Journal of Mathematical Biology*, 1992, 30(7): 755-763.
- [21] ZHAO X Q, JING Z J. Global asymptotic behavior in some cooperative systems of functional differential equations[J]. *Canadian Applied Mathematics Quarterly*, 1996, 4(4): 421-444.