

## 热敏神经网络中螺旋波死亡和破裂的数值模拟\*

马军<sup>1)2)†</sup> 谢振博<sup>1)</sup> 陈江星<sup>3)</sup>

1) (兰州理工大学物理系, 兰州 730050)

2) (甘肃省工业过程先进控制重点实验室, 兰州 730050)

3) (杭州电子科技大学物理系, 杭州 310018)

(2011年4月23日收到; 2011年5月25日收到修改稿)

实验发现大脑皮层内出现螺旋波且螺旋波对神经元电信号传递有积极作用. 利用细胞网络方法对大脑皮层观察到的螺旋波进行数值模拟. 以包含温度因子的热敏神经元模型在二维空间构造规则网络, 研究了神经元膜片温度参数对神经网络中螺旋波演化影响; 定义了一类统计同步因子来刻画温度因子引起螺旋波相变(破裂和死亡)的临界条件. 发现在规则网络下, 当温度超过一定值后螺旋波会死亡和消失而导致整个网络达到均匀同步; 在考虑了弱通道噪声情况下, 螺旋波温度超越一定临界值则引起螺旋波的破裂. 进一步分析了暂时性发烧昏迷的可能机制在于神经系统某些功能区螺旋波传播电信号的中断.

**关键词:** 螺旋波, 热敏神经元, 同步因子, 破裂

**PACS:** 87.19.lq, 87.19.lp, 05.45.Xt, 05.45.-a

## 1 引言

实验研究发现, 在一些心脏病患者的心肌组织中可以观察到细胞电活动呈现螺旋波, 而螺旋波的破裂则引起心室纤维性颤动, 导致心脏猝死<sup>[1-5]</sup>. 近年来, 人们对于反应扩散系统中螺旋波的形成、控制已经进行了广泛的研究, 并提出了很多有效的控制螺旋波的方法<sup>[6-30]</sup>, 如局部周期性激励诱导靶波控制螺旋波和时空混沌<sup>[31-34]</sup>、钙离子通道阻塞<sup>[35,36]</sup>、极化电场抑制等<sup>[37-40]</sup>. 对螺旋波的控制目标在于消除螺旋波和预防螺旋波破裂和失稳<sup>[41-46]</sup>, 文献<sup>[41-44]</sup>对该机制从实验和理论上细致分析和论证螺旋波的两种破裂机制: Doppler失稳和爱克斯失稳. 另一方面, 实验发现大脑皮层中也存在着螺旋波<sup>[47,48]</sup>, 研究表明这种螺旋波对电信号的传播有积极的作用. 文献<sup>[49-51]</sup>研究了神经网络中时空斑图和螺旋波的演化, 给出了一些很有趣的结果, 但所选取的模型都是不包含离子通道和温度因子的简化神经元模型, 无法考虑一些实际因素对螺旋波传播的影响, 也无法进一步和大脑皮层出现螺旋波的机制进行对应来展

开细致的研究. 我们利用细胞网络方法对神经网络中螺旋波的形成, 各类噪声引起的螺旋波破裂和鲁棒性进行了初步的研究, 发现即使在刺激电流为零的情况下, 神经网络中诱导出来的螺旋波可以穿越神经元静息区域, 由于螺旋波的自持续性而使得信号传递不中断, 且优化的噪声下螺旋波有很好的鲁棒性<sup>[52-54]</sup>. 实际上, 温度可以改变神经元的活性, 必然影响神经元的群体放电特性<sup>[55]</sup>. 如 Braun等<sup>[56,57]</sup>提出了改进的 Hodgkin-Huxley 模型来研究从巨头鲸电感受器里观察到的放电序列斑图, Gong等<sup>[58]</sup>则研究了热敏神经元复杂网络时空斑图有序化问题. 因此, 利用包含温度参数的神经元模型来研究神经元的群体动力学如关联共振<sup>[59-62]</sup>和螺旋波的演化具有重要的意义. 目前神经网络中斑图动力学的研究中采用的模型主要是包含温度因子的 Hodgkin-Huxley 的改进模型, 采用模型研究不能考虑一些生物因素的影响. 神经网络中的螺旋波是所有神经元相互作用后展现出来的群体性行为, 膜片温度作为可控参数, 其对应值的改变必然影响螺旋波演化, 如何界定这个临界参数并和实际生物物理问题关联起来并解释一

\* 国家自然科学基金(批准号: 11005026)和甘肃省教育厅研究生导师基金(批准号: 1010ZTC088)资助的课题.

† E-mail: hyperchaos@163.com

些神经放电异常引起的疾病是个非常有趣的问题.

另一方面,暂时性发烧昏迷是一个很普遍的症状,其可能机制在于神经正常放电活动的中断.本文以细胞网络方法对神经元网络中稳定旋转螺旋波对膜片温度变化的响应进行数值模拟,观测其演化过程并进行简单讨论.具体内容是以包含温度因子的 Hodgkin-Huxley 神经元模型构建神经网络<sup>[60]</sup>,研究神经元膜片温度升高对大脑皮层中螺旋波传递的影响,定义一类统计同步因子来刻画引起螺旋波显著相变如破裂、死亡的临界条件,希望对于短暂性发烧所致昏迷的机制有新的认识,以便为临床治疗和预防相关神经性疾病提供有益的参考信息.

## 2 网络模型和统计方法

神经元之间以其不同的耦合方式分为规则网络和小世界网络等.规则网络下神经元直接满足最近邻连接,小世界网络连接可以分解为局部规则连接和一定概率的长程连接.在小世界连接下局部规则连接可以很好地支撑螺旋波的存在,而长程连接多数情况下对螺旋波有扭曲和破坏作用,如当长程连接概率超过一定阈值则容易引起螺旋波的破裂.这里主要讨论规则连接下神经元网络中螺旋波受到温度变化的影响作用.为了描述刻画温度因子变化引起螺旋波相变,基于平均场理论引入二维空间的统计变量同步因子来确定引起螺旋波显著相变的临界温度值.这里以可测量的神经元膜电位为变量,同步统计因子  $R$  定义为

$$F = \frac{1}{N^2} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^N V_{ij} = \langle V \rangle_s,$$

$$R = \frac{\langle F^2 \rangle - \langle F \rangle^2}{\frac{1}{N^2} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^N (\langle V_{ij}^2 \rangle - \langle V_{ij} \rangle^2)},$$

其中变量  $V_{ij}$  描述结点  $(ij)$  的可测量的量值,这里将以神经元膜电位为测量的量,所有神经元被放置在二维空间的  $N \times N$  个格点上,格点之间满足最近邻相互连接,其对应的网络方程为

$$C_m \frac{dV_{ij}}{dt} = \tilde{g}_K n_{ij}^4 (V_K - V_{ij}) + \tilde{g}_{Na} m_{ij}^3 h_{ij} (V_{Na} - V_{ij}) + \tilde{g}_L (V_L - V_{ij}) + I_{ij} + D(V_{i-1j} + V_{i+1j} + V_{ij-1} + V_{ij+1} - 4V_{ij}), \quad (1a)$$

$$\frac{dm_{ij}}{dt} = \alpha_m(V_{ij})(1 - m_{ij}) - \beta_m(V_{ij})m_{ij} + \zeta_m(t), \quad (1b)$$

$$\frac{dh_{ij}}{dt} = \alpha_h(V_{ij})(1 - h_{ij}) - \beta_h(V_{ij})h_{ij} + \zeta_h(t), \quad (1c)$$

$$\frac{dn_{ij}}{dt} = \alpha_n(V_{ij})(1 - n_{ij}) - \beta_n(V_{ij})n_{ij} + \zeta_n(t); \quad (2d)$$

$$\alpha_m = a_m(V_{ij}) = \frac{0.1(V_{ij} + 40)\phi(T)}{1 - \exp(-(V_{ij} + 40)/10)},$$

$$\beta_m = \beta_m(V_{ij}) = 4\phi(T) \exp(-(V_{ij} + 65)/18), \quad (3a)$$

$$\alpha_h = \alpha_h(V_{ij}) = 0.07\phi(T) \exp(-(V_{ij} + 65)/20),$$

$$\beta_h = \beta_h(V_{ij}) = \frac{\phi(T)}{1 + \exp(-(V_{ij} + 35)/10)}, \quad (3b)$$

$$\alpha_n = \alpha_n(V_{ij}) = \frac{0.01(V_{ij} + 55)\phi(T)}{1 - \exp(-(V_{ij} + 55)/10)},$$

$$\beta_n = \beta_n(V_{ij}) = 0.125\phi(T) \exp(-V_{ij} + 65)/80; \quad (3c)$$

$$\phi(T) = 3^{(T-6.3^\circ C)/10^\circ C}, \quad (4)$$

$V_{ij}$  是神经元膜电位,下标  $(ij)$  表示神经元在网络中的位置.变量  $m, n, h$  是描述门通道的参量,膜电容  $C_m = 1 \mu\text{F}/\text{cm}^2$ , K 离子最大电导  $\tilde{g}_K = 36 \text{ mS}/\text{cm}^2$ , Na 离子最大电导  $\tilde{g}_{Na} = 120 \text{ mS}/\text{cm}^2$ , 漏流最大电导  $\tilde{g}_L = 0.3 \text{ mS}/\text{cm}^2$ , 作用个神经元上的刺激电流  $I_{ij} = I = 0$ , 反转电位  $V_K = -77 \text{ mV}$ ,  $V_{Na} = 50 \text{ mV}$ ,  $V_L = -54 \text{ mV}$ ,  $D$  表示耦合强度,  $\zeta_m, \zeta_n, \zeta_h$  表示离子通道噪声,其对应的统计关系为<sup>[63]</sup>

$$\langle \xi_m(t) \rangle = 0, \langle \xi_m(t)\xi_m(t') \rangle = \frac{2\alpha_m\beta_m}{N_{Na}(\alpha_m + \beta_m)} \delta(t - t') = D_m \delta(t - t'), \quad (5a)$$

$$\langle \xi_n(t) \rangle = 0, \langle \xi_n(t)\xi_n(t') \rangle = \frac{2\alpha_n\beta_n}{N_K(\alpha_n + \beta_n)} \delta(t - t') = D_n \delta(t - t'), \quad (5b)$$

$$\langle \xi_h(t) \rangle = 0, \langle \xi_h(t)\xi_h(t') \rangle$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{2\alpha_h\beta_h}{N_{Na}(\alpha_h + \beta_h)}\delta(t - t') \\
 &= D_h\delta(t - t'), \tag{5c}
 \end{aligned}$$

其中  $D_m, D_n$  和  $D_h$  分别描述离子通道噪声强度, 在  $t = t', \delta z(t - t') = 1, t \neq t'$  时  $\delta(t - t') = 0$ ;  $N_{Na}$  和  $N_K$  分别描述在给定膜面积下 Na 离子和 K 离子通道的总个数. 在均匀分布通道密度

下,  $\rho_{Na} = 60 \mu\text{m}^{-2}, \rho_K = 18 \mu\text{m}^{-2}$ , 离子通道的总数由  $N_{Na} = \rho_{Na}s$  和  $N_K = \rho_Ks$  决定, 其中  $s$  表示给定的膜面积, 单位为  $\mu\text{m}^{-2}$ . 本文首先讨论没有通道噪声情况下膜片温度对螺旋波存活的影响, 因为比较强的通道噪声容易导致螺旋波的破裂; 而研究重点在于温度效应, 所以进一步讨论弱噪声下温度变化对螺旋波的影响, 最后对该结果进行讨论分析.

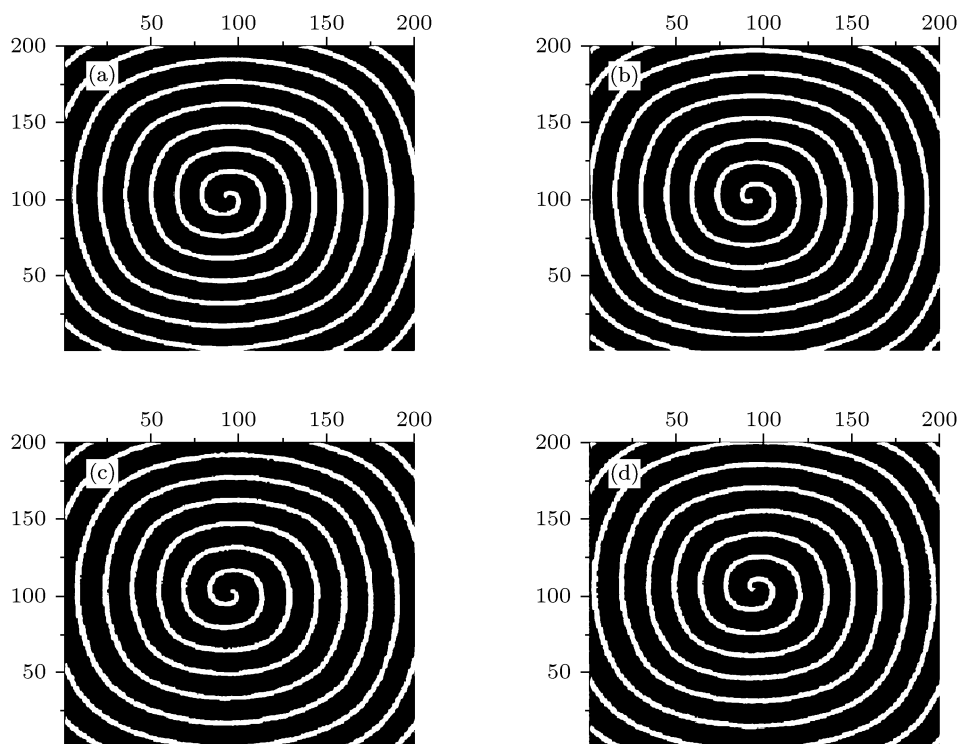


图1 螺旋波的诱导成型过程 (a), (b) 分别描述在无通道噪声下 300 和 600 时间单位的闪图; (c), (d) 分别描述在通道噪声下 400 和 800 时间单位的闪图. 该通道噪声强度对应的膜片面积  $s = 10 \mu\text{m}^{-2}$ ; 耦合强度  $D = 1$  且膜片温度为  $6.3 \text{ }^\circ\text{C}$ ; 闪图的灰度对应的刻度值范围为  $-80 \text{ mV}$ (黑)— $40 \text{ mV}$ (白)

### 3 数值模拟和讨论

数值模拟选取的积分步长为  $0.001(\text{ms})$ , 耦合强度为  $D = 1$ , 边界条件为无流边界, 对神经元的刺激电流强度为 0. 在一个  $200 \times 200$  的二维阵列上均匀放置 40000 个神经元, 神经元之间存在简单的最近邻耦合作用, 以一个稳定旋转的螺旋波作为初始条件, 该初始条件可以利用文献 [54,62] 中的方法来获得, 并从控制时刻 ( $t = 0$ ) 开始计算同步因子. 耦合强度  $D$  的选择不影响研究结果, 因为比较大的耦合强度只是导致螺旋波比较稀疏, 比较小的耦合强度导致螺旋波变得紧密. 在诱导一个完整的螺旋波来占据整个网络过程中, 设定网络中所有神经元的膜片温度为  $6.3 \text{ }^\circ\text{C}$ . 考虑到比较强的通道噪声容易引起螺旋波的破裂, 所以这里选择比较弱的通道

噪声强度, 如膜片面积  $s = 10 \mu\text{m}^{-2}$ , 历经一定的暂态过程后, 形成的稳定旋转螺旋波可以占据整个网络, 见图 1.

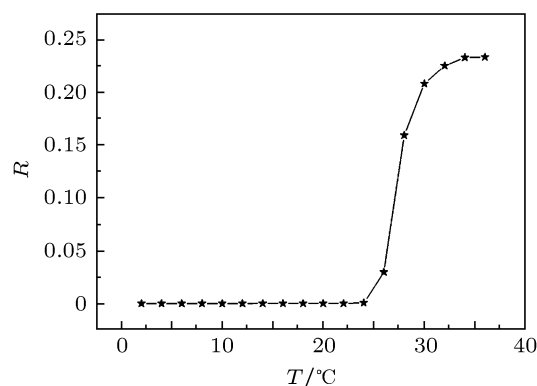


图2 以图 1(b) 稳定旋转的螺旋波作为初始值, 历经 800 时间单位后计算的不同膜片温度下的同步因子

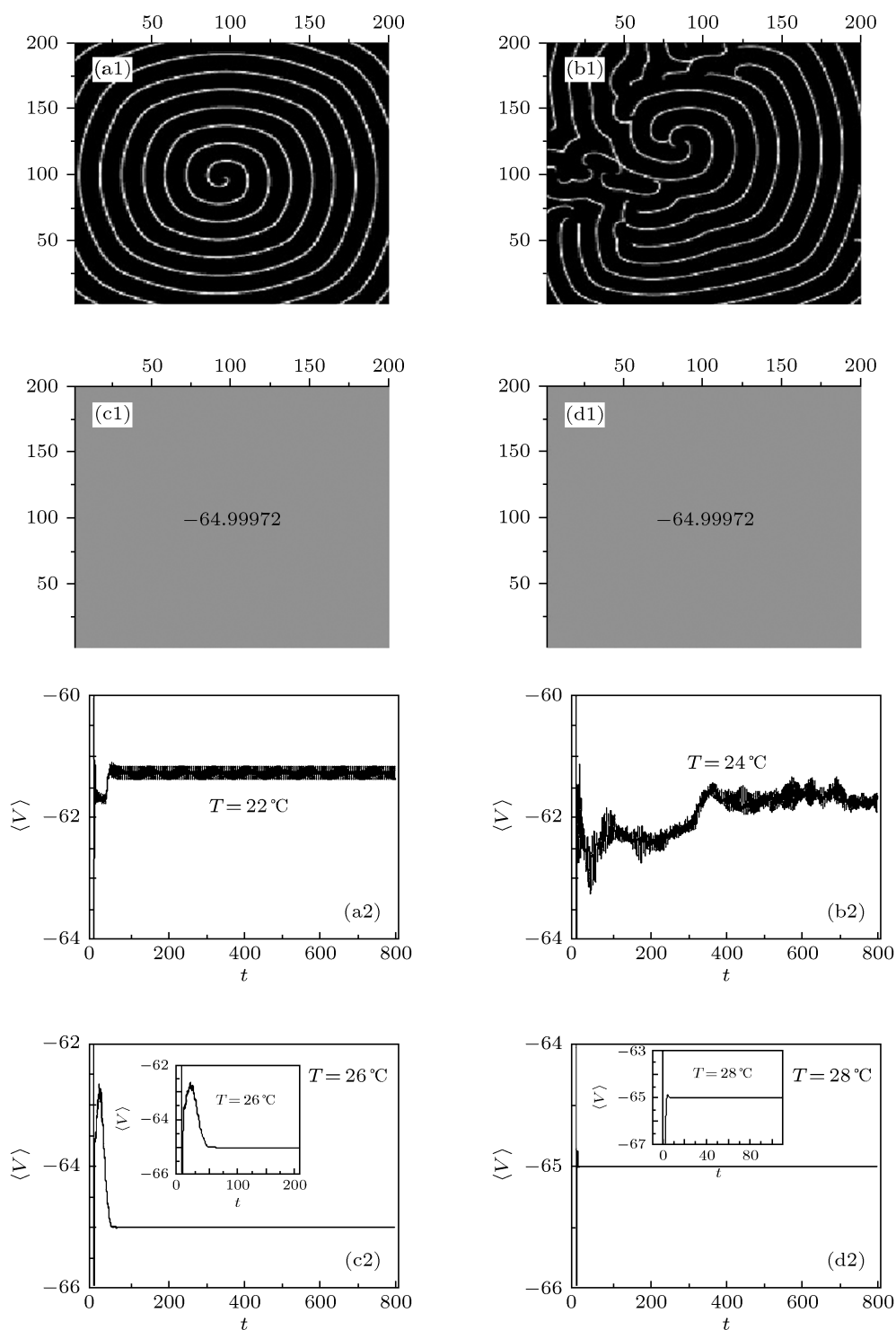


图3 神经元膜片温度上升到一定值后, 历经 800 时间单位螺旋波的演化结果, 以及对应的温度下所有神经元膜电位平均值随时间的演化 (a1)  $T = 22^\circ\text{C}$ ; (b1)  $T = 24^\circ\text{C}$ ; (c1)  $T = 26^\circ\text{C}$ ; (d1)  $T = 28^\circ\text{C}$

图 1 表明在耦合神经网络中可以诱导出稳定旋转的螺旋波并占据整个网络, 且对弱的通道噪声有一定的抗干扰性. 下面皆以图 1 的螺旋波作为初始值, 分别研究不同膜片温度下螺旋波的形态变化和对应的统计同步因子. 图 2 给出了没有通道噪

声时不同膜片温度下的同步因子对应的曲线.

在图 2 曲线中出现了明显的突变点, 该突变点对应的温度临界值大约为  $T = 26^\circ\text{C}$ ; 当膜片温度低于这个临界值时, 同步因子保持在一个比较小的值, 其意义在于对这个温度段的膜片温度变化, 网

络中的螺旋波没有显著的变化,螺旋波保持很好的鲁棒性;当膜片温度超越了这个临界值,统计同步因子的值出现显著的跃变,这预示着螺旋波出现了明显的相变,其机制在于超过该临界值的温度使得神经元的活性发生了显著改变,从而影响到网络中神经元群体放电行为.(1)式给出了同步因子的表达式,同步因子是可测量物理量对一定时间段和空间的平均,当整个系统达到同步后,其值并不等于1;螺旋波作为一种有序态,在空间上展现为系统有规则的排列,其同步因子必然趋于一个有限值.例如,在诱导螺旋波成型并占据整个网络的过程中,随着计算时间的增长,同步因子逐渐衰减到一个稳定值.图2计算的同步因子是以稳定旋转的螺旋波作为初始值,在螺旋波没有显著破坏(仍然占据整个网络)情况下,刻画其有序程度的同步因子必然处于一个很小的刻度值,而一旦系统发生了显著变化,其有序态被破坏必然导致同步因子发生大幅度变化.因此,利用同步因子作为序参量来刻画参数变化引起的螺旋波相变具有可观测性和一定的合理性.图3分别给出了临界点附近膜片温度对应的螺旋波演化结果.

图3的结果表明,当温度上升到一定阈值约 $26^{\circ}\text{C}$ ,稳定旋转的螺旋波发生了显著变化.膜片温度接近 $24^{\circ}\text{C}$ 时螺旋波发生形变且局部破裂,导致其对应的平均膜电位的时间序列不再有规律地随时间变化;小于 $24^{\circ}\text{C}$ 时螺旋波保持很好的稳定性,其对应时间序列呈现出有规律的周期变化;当膜片温度大于 $26^{\circ}\text{C}$ ,螺旋波彻底消失,其膜电位平均值的时间序列很快趋于稳定值,此时整个网络达到稳定性均匀同步.从高于临界温度值的膜电位平均值的时间序列可以发现,在比较高的膜片温度下螺旋波更容易被消除.当螺旋波消除后整个网络达到均匀化同步,实际上所有神经元恢复到静息态,螺旋波传递神经元电信号被中断,神经元之间正常的电活动被破坏,从而可能导致某些功能区发生故障,诱发某种神经性疾病.因此,确保神经元膜片温度在临界值下对螺旋波存活非常关键.在实际的神经网络中,神经元离子通道随机性导致通道噪声,而通道噪声对单个神经元放电以及神经元群体放电特性都有显著影响.进一步分析了弱噪声下膜片温度变化对螺旋波的影响,计算结果见图4和图5.

图4结果表明,在考虑弱通道噪声情况下,膜片温度升高同样也引起螺旋波的显著相变,与没有通道噪声情况不同的是,温度升高到一定临界值约 $32^{\circ}\text{C}$ 则引起螺旋波的破裂.与没有通道噪声的

情况对比发现,即使存在非常弱的通道噪声,神经元膜片温度升高到一定临界值也必然引起螺旋波的相变,不同的是螺旋波的演化结果不同,且临界温度值也有区别.图5给出了临界温度值附近几个膜片温度值历经800时间单位后的螺旋波演化结果和膜电位平均值时间序列.

图5的结果表明,当膜片温度低于一定的临界值时,网络中螺旋波仍然存在,但与没有通道噪声情况下对比,螺旋波开始变得不均匀;当膜片温度接近临界温度 $32^{\circ}\text{C}$ 时,网络中单臂螺旋波破裂演化为多臂螺旋波并有破裂演化趋势;进一步增加膜片温度到临界温度 $32^{\circ}\text{C}$ ,螺旋波消失,而在弱通道噪声下,整个网络进入无序态,其原因在于网络中出现许多螺旋波片断互相碰撞而导致系统进入无序态;螺旋波从有序态进入无序态预示着螺旋波的破裂,通过观察膜片温度为 $28^{\circ}\text{C}$ 下螺旋波的演化过程,可以看到螺旋波从波头处开始分裂,这对应着已发现的螺旋波破裂机制中的Doppler失稳机制.进一步观察网络所有神经元膜电位平均值的时间序列发现,临界温度附近对应的神经元膜电位平均值随着时间不再严格地呈现周期变化,其原因在于弱噪声的影响.对比图4,图5和图2,图3的结果发现,弱的通道噪声使得螺旋波最终的演化结果产生巨大差别,且临界温度也发生偏移.在没有通道噪声的情况下,当膜片温度超过对应的临界值则导致稳定旋转的螺旋波消失,且整个系统达到稳定均匀的同步态;在网络中存在比较弱的通道噪声时,膜片温度超过对应的临界值则导致螺旋波破裂,且整个系统进入无序态.

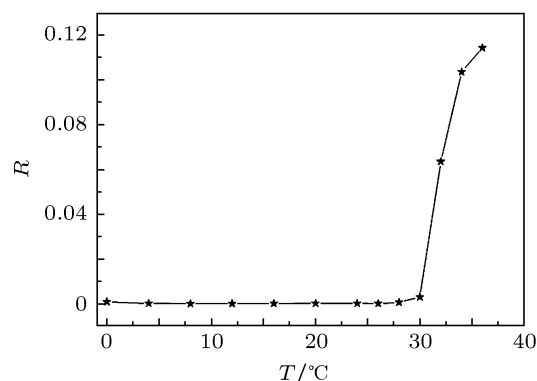


图4 以图1(d)稳定旋转的螺旋波作为初始值,通道噪声强度 $s = 10 \mu\text{m}^{-2}$ ,历经800时间单位后计算的不同膜片温度下的同步因子

以上两种情况下,由于神经元膜片温度超过一定阈值则导致神经网络中螺旋波的破裂或者死

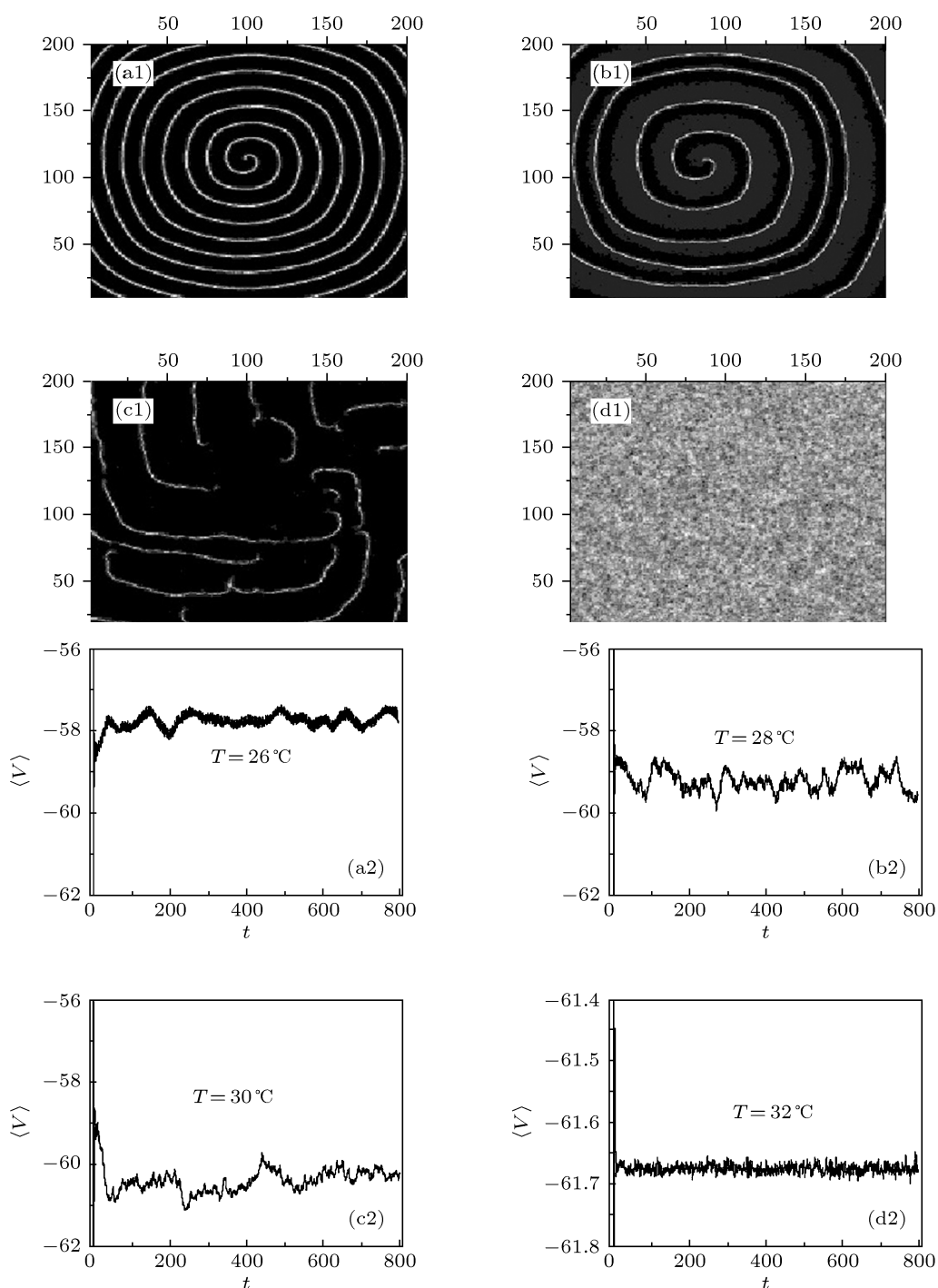


图5 通道噪声强度  $s = 10 \mu\text{m}^{-2}$  时, 神经元膜片温度上升到一定值后, 历经 800 时间单位螺旋波的演化结果, 以及对应的膜片温度下所有神经元膜电位平均值随时间的演化 (a1)  $T = 26^\circ\text{C}$ ; (b1)  $T = 28^\circ\text{C}$ ; (c1)  $T = 30^\circ\text{C}$ ; (d1)  $T = 32^\circ\text{C}$

亡, 从而导致螺旋波信号穿越神经元网络的某些静息区时信号传递发生中断, 这必然导致正常的神经元放电活动发生中断, 引起某些功能区产生功能性障碍, 从而导致短暂性发烧昏迷等疾病. 从螺旋波诱导占据整个网络的演化过程中知道, 即使刺激电流等于 0, 在网络耦合作用下, 螺旋波在静息态区域也可以逐渐增大并逐渐占据整个网络, 即螺旋波传

递方式并不要求神经系统内所有的神经元都处于放电状态, 一部分神经元可以处于休眠, 这与当前研究发现的大脑皮层中并非所有神经元都处于活跃态一致, 一个典型的例子就是人睡眠的时候神经系统还能正常工作. 虽然数值计算的临界温度值可能和某些实际的动物短暂性发烧昏迷的实际温度有差别, 如儿童在  $40^\circ\text{C}$  以上容易昏迷沉睡, 其原

因可能是神经网络中, 神经元耦合强度可能是动态变化的, 离子通道噪声强度的真实值不能准确确定 (考虑了通道噪声的膜片临界温度比无通道噪声下的膜片温度高, 但模型中通道噪声强度应该是多少还需要进一步的实验研究和测量), 以及这里使用的神经元模型没有考虑胶质细胞的作用等, 这需要进行进一步的实验研究来对理论模型的有关参数进行修正. 但以上研究结果表明, 神经元膜片温度上升到一定临界值引起的螺旋波破裂或者死亡则导致神经系统某些区域或功能区正常信号放电和传递发生中断, 这可能是短暂性发烧昏迷发生的机制. 从临床治疗角度看, 可以通过确保螺旋波保持鲁棒性或者预防螺旋波破裂来预防治疗短暂性发烧昏迷等疾病. 和前期的相关研究不同的是, 这里选取了包含温度因子和通道噪声的 Hodgkin-Huxley 神经元模型来构建网络, 以稳定旋转的螺旋波为初始值来对应试验上大脑皮层中观察到的螺旋波, 以膜片温度变化作为可控参数来研究螺旋波的演化历程, 通过定义和计算统计同步因子来表征系统的有序程度, 并确定系统相变的临界参数, 和实际的短暂性发烧昏迷症状做简单对比, 不同于非线性动力学控制中简单的分岔参数控制. 初步研究结果可能为进一步深入研究相关实验和模型修正提供重要的参考.

## 4 结论

研究了二维空间的神经网络中螺旋波对膜片温度变化的响应, 用包含温度因子的 Hodgkin-Huxley 方程组来描述神经元放电的热敏特性. 以可测量的神经元膜电位序列和平均值构造统计同步因子来刻画膜片温度变化引起的螺旋波的相变 (破裂和死亡). 在同步因子曲线上发现了明显的跃变点, 这些跃变点对应的温度就是引起螺旋波相变的临界温度. 研究结果表明: 1) 在没有通道噪声情况下, 膜片温度低于临界值约  $26\text{ }^{\circ}\text{C}$  时螺旋波保持很好的鲁棒性, 当膜片温度超过这个临界值则导致螺旋波的死亡, 整个网络变得均匀化和同步, 导致螺旋波在静息态区域传播中断, 整个系统恢复到静息态, 神经元不再活跃而引发功能区障碍; 2) 在弱通道噪声下, 膜片温度低于一定的临界值约  $32\text{ }^{\circ}\text{C}$  时螺旋波仍然存活, 而当膜片温度高于该临界值则导致螺旋波破裂, 整个网络进入无序态, 导致整个网络神经元群体放电紊乱, 可能诱发某种神经性疾病; 3) 这种相变可能与短暂性发烧昏迷相关, 其可能机制在于膜片温度超过一定临界值导致螺旋波在穿越静息区被阻断, 从而导致功能性障碍. 研究结果可为今后实验研究和模型修正提供部分有益的参考.

- [1] Gray R A, Pertsov A M, Jalife J 1998 *Nature* **392** 75
- [2] Biktashev V N, Holden A V 1998 *Chaos* **8** 48
- [3] Cherry E M, Fenton F H 2008 *New J. Phys.* **10** 125016
- [4] Fenton F H, Luther S, Otani N F 2009 *Circulation* **120** 467
- [5] Garzon A, Roman O G, Fenton F H 2009 *Phys. Rev. E* **80** 021932
- [6] Ma J, Ying H, Li Y L 2007 *Chin. Phys.* **16** 955
- [7] Ma J, Jin W Y, Li Y L, Chen Y 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 2456 (in Chinese) [马军, 靳伍银, 李延龙, 陈勇 2007 物理学报 **56** 2456]
- [8] Deng M Y, Shi J, Li H B, Kong L J, Liu M R 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 2012 (in Chinese) [邓敏艺, 施娟, 李华兵, 孔令江, 刘慕仁 2007 物理学报 **56** 2012]
- [9] Liu F C, Wang X F, Li X C, Dong L F 2007 *Chin. Phys.* **16** 2640
- [10] Yin X Z, Liu Y 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 6844 (in Chinese) [尹小舟, 刘勇 2008 物理学报 **57** 6844]
- [11] Tang J, Ma J, Yi M, Jia Y 2008 *Chin. Phys. B* **17** 4100
- [12] Ma J, Wang C N, Jin W Y, Li Y L, Pu Z S 2008 *Chin. Phys. B* **17** 2844
- [13] Ma J, Yi M, Li B W, Li Y L 2008 *Chin. Phys. B* **17** 2438
- [14] Gan Z N, Ma J, Zhang G Y, Chen Y 2008 *Chin. Phys. B* **17** 4047
- [15] Zhang G Y, Ma J, Yu L C, Chen Y 2008 *Chin. Phys. B* **17** 4107
- [16] Dai Y, Tang G N 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 1491 (in Chinese) [戴瑜, 唐国宁 2009 物理学报 **58** 1491]
- [17] Zhang L S, Deng M Y, Kong L J, Liu M R, Tang G N 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 4493 (in Chinese) [张立升, 邓敏艺, 孔令江, 刘慕仁, 唐国宁 2009 物理学报 **58** 4493]
- [18] Qiu K, Tang J, Ma J, Luo J M 2010 *Chin. Phys. B* **19** 030508
- [19] Gan Z N, Chen X M 2010 *Chin. Phys. B* **19** 050514
- [20] Qian Y, Huang X D, Liao X H, Hu G 2010 *Chin. Phys. B* **19** 050513
- [21] Xie L L, Gao J H 2010 *Chin. Phys. B* **19** 060516
- [22] Tang D N, Tang G N 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 2319 (in Chinese) [唐冬妮, 唐国宁 2010 物理学报 **59** 2319]
- [23] Tang D N, Zhang X, Ren W, Tang G N 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 5313 (in Chinese) [唐冬妮, 张旭, 任卫, 唐国宁 2010 物理学报 **59** 5313]
- [24] Zhong M, Tang G N 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 1593 (in Chinese) [钟敏, 唐国宁 2010 物理学报 **59** 1593]
- [25] Dai Y, Wei H M, Tang G N 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 5979 (in Chinese) [戴瑜, 韦海明, 唐国宁 2010 物理学报 **59** 5979]
- [26] Wei H M, Tang G N 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 030501 (in Chinese) [韦海明, 唐国宁 2011 物理学报 **60** 030501]
- [27] Deng M Y, Tang G N, Kong L J, Liu M R 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 2339 (in Chinese) [邓敏艺, 唐国宁, 孔令江, 刘慕仁 2010 物理学报 **59** 2339]
- [28] Wei H M, Tang G N 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 040504 (in Chinese) [韦海明, 唐国宁 2011 物理学报 **60** 040504]
- [29] Deng M Y, Tang G N, Kong L J, Liu M R 2011 *Chin. Phys. B* **20** 020510

- [30] Yuan G Y 2011 *Chin. Phys. B* **20** 040503
- [31] Fu Y Q, Zhang H, Cao Z J 2005 *Phys. Rev. E* **72** 046206
- [32] Zhang H, Chen J X, Li Y Q 2006 *J. Chem. Phys.* **125** 204503
- [33] Cao Z J, Li P F, Zhang H 2007 *Chaos* **17** 015107
- [34] Yuan G Y, Yang S P, Wang G R, Chen S G 2008 *Chin. Phys. B* **17** 1925
- [35] Stamp A T, Osipov G V, Collins J J 2002 *Chaos* **12** 931
- [36] Zhong M, Tang G N 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 3070 (in Chinese)  
[钟敏, 唐国宁 2010 物理学报 **59** 3070]
- [37] Chen J X, Zhang H, Li Y Q 2006 *J. Chem. Phys.* **124** 014505
- [38] Chen J X, Hu B B 2008 *Euro Phys. Lett.* **84** 34002
- [39] Chen J X, Xu J R, Yuan X P 2009 *J. Phys. Chem. B* **11** 849
- [40] Tang J, Jia Y, Ma J 2009 *Commun. Theor. Phys.* **51** 941
- [41] Ouyang Q, Felesselles J M 1996 *Nature* **379** 143
- [42] Ouyang Q, Swinney H L, Li G 2000 *Phys. Rev. Lett.* **84** 1047
- [43] Zhou L Q, Ouyang Q 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 1650
- [44] Fenton F H, Cherry E M, Hastings H M 2002 *Chaos* **12** 852
- [45] Yang J Z, Xie F G, Qu Z L 2003 *Phys. Rev. Lett.* **91** 148302
- [46] Bär M, Brusch L, Or-Guil M 2004 *Phys. Rev. Lett.* **92** 119801
- [47] Huang X Y, Troy W C, Yang Q 2004 *J. Neurosci.* **24** 9897
- [48] Schiff S J, Huang X Y, Wu J Y 2007 *Phys. Rev. Lett.* **98** 178102
- [49] He D H, Shi P L, Stone L W 2003 *Phys. Rev. E* **67** 27201
- [50] Woo S J, Lee J, Lee J K 2003 *Phys. Rev. E* **68** 016208
- [51] Perc M 2007 *Chaos, Solitons and Fractals* **31** 280
- [52] Ma J, Wu Y, Ying H P 2011 *Chin. Sci. Bull.* **56** 151
- [53] Ma J, Yang L J, Wu Y 2010 *Commun. Theor. Phys.* **54** 583
- [54] Ma J, Wang C N, Jin W Y 2010 *Appl. Math. Comput.* **217** 3844
- [55] Hodgkin A L, Huxley A F 1952 *J. Phys. London* **117** 500
- [56] Braun H A, Wissing H, Schäfer 1994 *Nature* **367** 270
- [57] Braun H A, Schafer K, Voigt K 1997 *J. Comp. Neurol.* **4** 335
- [58] Gong Y B, Xu B, Xu Q 2006 *Phys. Rev. E* **73** 046137
- [59] Sun X J, Perc M, Lu Q S 2008 *Chaos* **18** 023102
- [60] Sun X J, Lu Q S, Kurth J 2009 *Int. J. Bifur. Chaos* **19** 737
- [61] Wang Q Y, Perc M, Duan Z S 2008 *Phys. Lett. A* **372** 5681
- [62] Yu G, Ma J, Tang J 2010 *Int. J. Mod. Phys. B* **24** 4555
- [63] Fox R F, Lu Y N 1994 *Phys. Rev. E* **49** 3421



# Numerical study of the death and breakup of spiral wave in the networks of thermosensitive neurons\*

Ma Jun<sup>1)2)†</sup> Xie Zhen-Bo<sup>1)</sup> Chen Jiang-Xing<sup>3)</sup>

1) (*Department of Physics, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China*)

2) (*Key Laboratory of Gansu Advanced Control for Industria Processes, Lanzhou 730050, China*)

3) (*Department of Physics, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China*)

(Received 23 April 2011; revised manuscript received 25 May 2011)

## Abstract

The experimental evidences confirm that spiral waves are observed in the disinhibited mammalian neocortex. The scheme of cellular networks is used to simulate the formation and the evolution of spiral wave in the neocortical slices. The regular networks of neurons are constructed in the two-dimensional space, the dynamical properties of thermosensitive neurons is described by temperature factor, and the effect of membrane temperature on the evolution of spiral wave is investigated in detail. A statistical factor of synchronization is defined to measure the critical condition inducing phase transition of spiral wave (death or breakup) by the factor of temperature of membrane. It is confirmed that spiral wave is removed and the whole networks become homogeneous and synchronous completely when the membrane temperature exceeds a certain threshold; the breakup of spiral wave is induced in the presence of weak channel noise being considered. Furthermore, it is suggested that the mechanism of temporary heat stupor could be the blocking of spiral wave propagation in some functional domain.

**Keywords:** spiral wave, thermosensitive neuron, factor of synchronization, breakup

**PACS:** 87.19.lq, 87.19.lp, 05.45.Xt, 05.45.–a

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11005026) and the Educational Tutors Fund of Gansu Province, China (Grant No. 1010ZTC088).

† E-mail: hyperchaos@163.com