

心脏老化和收缩对螺旋波动力学的研究*

刘海英¹⁾²⁾ 杨翠云^{2)†} 唐国宁^{1)‡}

1) (广西师范大学物理与科学技术学院, 桂林 541004)

2) (桂林师范高等专科学校物理与信息技术系, 桂林 541002)

(2012年6月7日收到; 2012年7月21日收到修改稿)

通过用 Greenberg-Hasting 元胞自动机模型的邻域半径和激发阈值的增大来模拟心脏老化, 用邻域半径交替变化代替心脏收缩与舒张, 数值模拟研究了心脏老化和有规律收缩对螺旋波动力学的研究. 结果表明: 心脏老化会导致螺旋波漫游和不能产生螺旋波, 既可以使螺旋波波长缩短和螺旋波周期维持不变, 也可以使螺旋波的波长变长和周期增大; 在心脏老化和有规律收缩共同作用下, 系统可出现不同形状的螺旋波斑图、螺旋波发生破碎和消失等现象, 给出了心力衰竭、心颤、死亡的发生概率, 这些结果与流行病相关调查结果基本符合.

关键词: 离散可激发介质, 螺旋波, 邻域半径, 激发阈值

PACS: 05.45.-a, 87.18.Hf

DOI: 10.7498/aps.62.010505

1 引言

螺旋波是自然界中普遍存在的一种非平衡斑图, 它已经在生物、物理和化学系统中被观察到, 如 B-Z 反应^[1]、铂金表面的一氧化碳催化氧化反应^[2]、心脏中的螺旋波电信号^[3]等. 研究表明: 心律不齐可能与心肌组织出现螺旋波有关, 螺旋波的失稳将引起心颤, 危及生物体的生命^[4]. 如何有效消除心脏中的螺旋波电信号和心颤, 依赖人们对螺旋波动力学的彻底了解, 因此对螺旋波动力学的研究引起了不少研究者的关注^[5-10].

对反应扩散系统中的螺旋波, 人们发现有多种因素可以导致螺旋波漫游或破碎, 例如介质的激发性降低^[11,12]、外部周期调制对螺旋波的扰动^[13]、介质的不均匀^[14-17]、早期后去极化^[18]、心脏肌肉收缩(机械形变)^[19,20]等因素都会对螺旋波动力学有影响. 随着年龄的增长, 心脏会相应地老化, 其老化过程表现为心脏每年丧失几百万个心肌细胞, 导致有活性的心肌细胞肥大, 以便维持心脏的质量^[21]. 一方面心脏老化改变了细胞之间的距离

和耦合关系, 另一方面导致介质激发性降低. 但心脏老化对螺旋波产生怎样的影响仍缺乏研究, 这些研究对弄清楚心脏老化与心力衰竭的关系有重要意义.

本文采用 Greenberg-Hasting (GH) 元胞自动机模型研究心脏老化和有规律收缩对螺旋波的影响, 在研究中, 通过改变邻域半径和激发阈值来模拟心脏老化, 通过交替改变邻域半径模拟心脏的收缩和舒张. 研究发现, 心脏老化和有规律的收缩在一定情况下会导致稳定螺旋波失稳, 出现呼吸螺旋波、螺旋波漫游和破碎等现象. 这些现象分别与心脏出现的交替(alternans)、心力衰竭和心颤相关. 下面我们先介绍模型, 然后研究心脏老化对螺旋波的影响, 接着研究心脏老化和有规律的收缩共同对螺旋波的影响, 最后是结论与讨论.

2 模型

GH 模型是由 Greenberg 和 Hasting^[22] 在 1978 年提出的一个离散可激发介质模型, 演化规则如下:

* 国家自然科学基金(批准号:11165004)和广西教育厅科研项目(编号:201106LX699)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: yangcuiyun_gl@foxmail.com

‡ 通讯作者. E-mail: tangguoning@sohu.com

$$u_{i,j}(t+1) = \begin{cases} (u_{i,j}(t) + 1) \bmod K, & \text{if } 1 \leq u_{i,j}(t) \leq K - 1 \\ 1, & \text{if } S(u_{i,j}(t) = 0) \geq S_{th} \\ 0, & \text{if } S(u_{i,j}(t) = 0) < S_{th} \end{cases} \quad (1)$$

式中 i, j 为二维方形点阵上一个元胞的空间位置的标号, 该位置上的元胞用元胞 (i, j) 表示. \bmod 表示求余, $u_{i,j}(t)$ 为元胞 (i, j) 在 t 时刻的状态函数, 其中 $u_{i,j} = 0, 1$ 分别为元胞的静息态和激发态, $u_{i,j} = 2, 3, \dots, K - 1$ 为元胞的不应态, 一个元胞的状态总数为 K ; $S(u_{i,j}(t) = 0)$ 表示 t 时刻处于静息态的元胞 (i, j) 有 S 邻居处于激发态, S_{th} 为元胞的激发阈值, 当 $S \geq S_{th}$ 时, 下一时刻该元胞进入激发态. 本文始终做如下处理: 选取空间为 400×400 的格点进行模拟, 相邻元胞的距离为 1, 采用无流边界条件, 考虑离散的时间步 $t = 0, 1, 2, \dots$; 为了减少采用正方形点阵带来各向异性影响, 采用扩展的 Moor 邻居, 取元胞的邻居半径 $R \geq 2$, 邻域内共有 $(2R + 1)^2$ 个元胞, 一个元胞共有 $(2R + 1)^2 - 1$ 个邻居, 对于位于边界附近的元胞, 其邻居数量 S' 如果小于 $(2R + 1)^2 - 1$, 则相应元胞的激发阈值取 $S'_{th} = \text{int}[S_{th}S' / ((2R + 1)^2 - 1)]$, 这里 int 表示取整数. 显然元胞激发阈值的大小, 反映了元胞可被激发的难易程度: 元胞的激发阈值低, 元胞就容易被激发, 元胞的可激发性就高; 反之, 元胞的激发性就低. 在下面的模拟中, 固定取 $K = 8$ 和取激发阈值 $S_{th} \geq 2$, 邻域半径 R 在 $[2, 8]$ 范围内变化, 通过使用截断平面波方式产生螺旋波.

3 心脏老化对螺旋波的影响

考虑到心肌细胞可通过成纤维细胞与远处的心肌细胞建立电耦合^[23], 当心脏出现老化时, 如果心肌细胞出现死亡和肥大, 都会导致心肌组织的可激发性降低, 需要通过成纤维细胞建立活性心肌细胞之间的更广泛电耦合, 以维持介质的激发性 and 电信号可传播性. 我们用提高元胞的激发阈值和增大细胞邻域半径来表示心脏老年化过程.

数值结果表明, 给定一个邻域半径 R , 存在一个临界激发阈值 $S_{th,c}$, 当 $S_{th} > S_{th,c}$ 时将无法产生螺旋波. 当激发阈值在小于 $S_{th,c}$ 的附近取值, 得到漫游螺旋波, 其他情形可得到稳定螺旋波. 所谓稳定螺旋波是指其波头运动范围被约束在邻域内, 否则为漫游螺旋波. 图 1 给出了在 $S_{th}-R$ 平面上的相图, 从图 1 可以看出: 当激发阈值没有接近临界激发阈

值 (即在图 1 的区域 2 取值) 时, 螺旋波为稳定螺旋波, 这个结果反映了两层意思, 一是细胞的可激发性高 (即激发阈值小), 更多的耦合对提高介质激发性没有影响, 二是细胞的激发性相对较低, 通过扩大耦合提高了细胞的可激发性, 这反映了心脏对环境影响的调节能力; 当激发阈值接近临界激发阈值且 $R \geq 4$ (即在图 1 的区域 3 取值) 时, 出现螺旋波漫游, 可见在 R 较小的情况下不会出现螺旋波漫游. 当激发阈值在图 1 的区域 4 取值时, 介质无法产生螺旋波, 这反映了心肌细胞可激发性低 (即激发阈值过大), 心脏不能通过增加耦合使细胞获得足够的激发性. 一般有: 在同一 R 下, 比值 S_{th}/R 越小, 螺旋波就越稳定, 随着比值 S_{th}/R 的逐渐增大, 螺旋波开始出现漫游, 最后导致在介质中不能产生螺旋波.

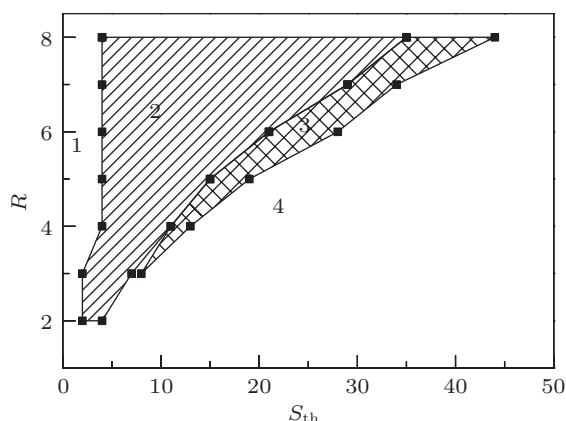


图 1 在 $S_{th}-R$ 参数平面上的相图 数值 1 代表由于介质的激发性太高而不能产生期望的单螺旋波的参数区, 数值 2 为稳定螺旋波的参数区, 数值 3 为漫游螺旋波参数区, 数值 4 代表右边界空白区, 对应由于介质的激发性太低不能产生螺旋波的参数区

为了进一步了解螺旋波的漫游现象, 图 2 给出了螺旋波漫游时几种典型的波头运动的轨迹. 从图 2 可以看出, 对于行走型螺旋波, 螺旋波的波头一般沿正方形介质的对角线或边界线运动 (参见图 2(a)–(c)). 图 2(a) 中螺旋波对应的比值 $S_{th}/R = 2.75$, 螺旋波先沿对角线朝边界方向运动, 最后螺旋波稳定在边界附近; 图 2(b) 中螺旋波沿着正方形介质的对角线来回运动, 这时比值 $S_{th}/R = 3$; 图 2(c) 中螺旋波沿着正方形边界运动, 这时比值 $S_{th}/R = 4.5$. 图 2 (d)–(f) 对应非行走型螺旋波, 波

头轨迹一般为圆或圆滚线, 对应的 S_{th}/R 值分别为 5, 5.25 和 5, 其中图 2 (f) 的螺旋波大约在 4000 时步时漫游出系统边界, 系统回到静息态. 从这些结

果可以看出, 比值 S_{th}/R 相对较小, 漫游螺旋波的波头运动轨迹近似为直线, 比值 S_{th}/R 相对较大则近似为圆.

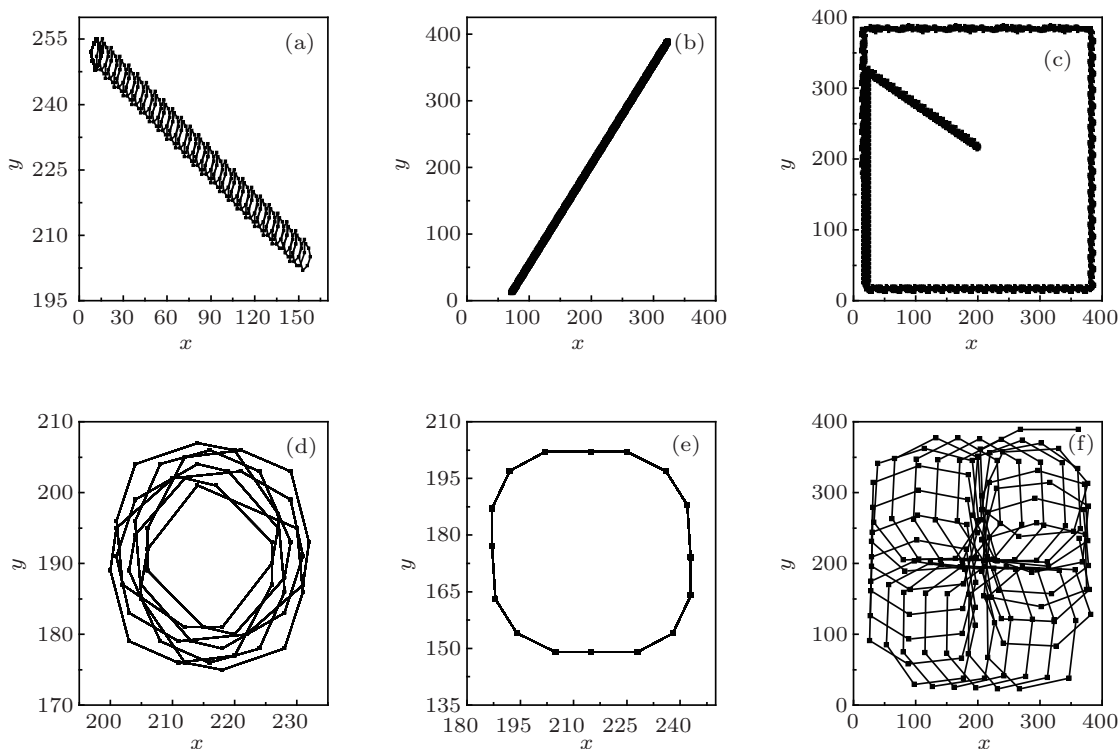


图 2 不同参数下螺旋波的轨迹 (a) $S_{th} = 11, R = 4$; (b) $S_{th} = 15, R = 5$; (c) $S_{th} = 36, R = 8$; (d) $S_{th} = 40, R = 8$; (e) $S_{th} = 42, R = 8$; (f) $S_{th} = 35, R = 7$

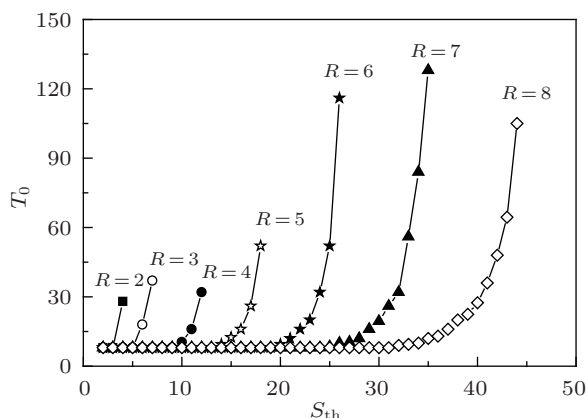


图 3 在不同邻域半径下螺旋波周期 T_0 随激发阈值 S_{th} 的变化曲线

下面研究心脏老化对螺旋波周期的影响. 螺旋波的周期 T_0 可通过空间某一点振荡周期的平均值来给出, 图 3 给出了在不同邻域半径下螺旋波周期随邻域半径的变化曲线. 从图 3 中可以看到, 给定元胞的邻域半径, 当元胞的激发阈值 S_{th} 比临界激发阈值 $S_{th,c}$ 小很多时, 稳定螺旋波的周期 T_0 等于元胞状态数 K , 即 $T_0 = K$. 随着元胞激发阈值的

增加, 螺旋波的周期将逐渐增大, 当 S_{th} 接近其 $S_{th,c}$ 时, 螺旋波的周期增加到元胞状态数的十几倍, 如当 $S_{th} = 26, R = 6$ 螺旋波的周期是 116, 远远大于元胞状态数. 产生这种现象的原因是, 当 S_{th} 接近其 $S_{th,c}$ 时, 出现螺旋波的波长增大, 同时其波速减小, 由波速公式 $v = \lambda/T_0$ 可知, 螺旋波周期一定会增大.

下面来研究心脏老化对稳定螺旋波的影响. 图 4 给出了不同邻域半径和激发阈值下稳定螺旋波的斑图. 比较图 4(a) 和 (b) 可以看出: 在同一激发阈值下, 随着邻域半径的增大, 螺旋波的波长将变长, 因为螺旋波周期不变, 所以导致波速增大, 相应的螺旋波波臂变粗 (波臂宽度接近状态数乘以邻域半径 KR). 比较图 4(b) 和 (c) 可以看出: 在同一邻域半径下, 激发阈值的增大会导致螺旋波的波长变短和波臂变细. 为了进一步看清激发阈值对螺旋波的波长的影响, 图 5 给出了在 $R = 6, 8$ 情况下稳定螺旋波的波长随激发阈值的变化曲线, 图中螺旋波的周期 $T_0 = K = 8$. 从图 5 可以看出, 当 S_{th} 较小时, 螺

螺旋波的波长不改变,但在给定 R 的情况下,随着激发阈值的增大波长呈减小的趋势,由波速公式

$v = \lambda/T_0$ 可知,螺旋波的波速也将减小,增大 R 可导致波速增加.

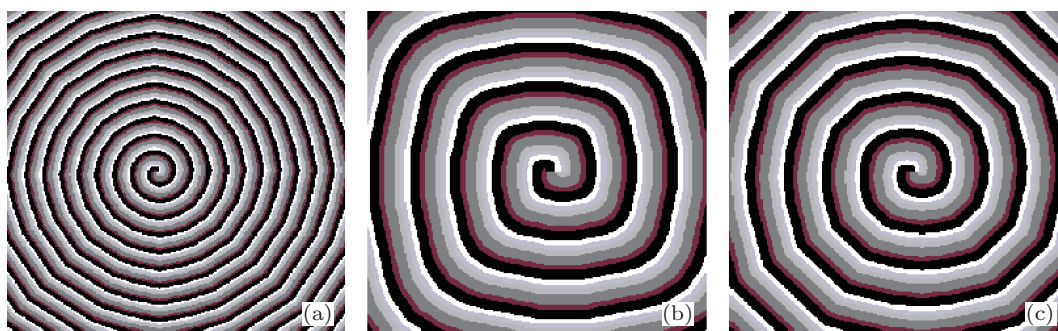


图4 不同参数下稳定的螺旋波斑图 (a) $S_{th} = 6, R = 3$; (b) $S_{th} = 6, R = 6$; (c) $S_{th} = 11, R = 6$

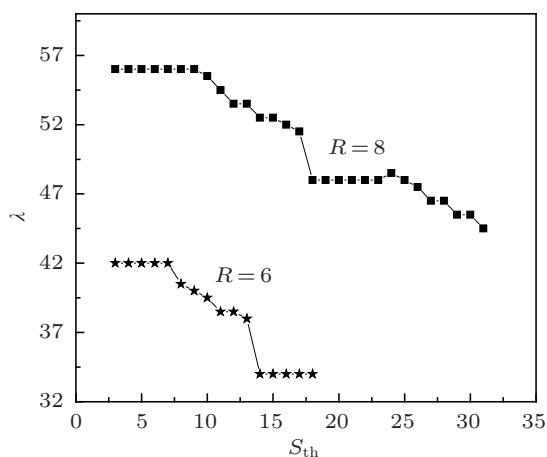


图5 在 $R = 6, 8$ 情况下周期为 8 的稳定螺旋波波长 λ 随激发阈值 S_{th} 的变化曲线

4 心脏老化与有规律收缩对螺旋波的影响

心脏主要功能就是起泵血作用,通过收缩和舒张来实现.假设一个元胞可以与空间距离小于 d 的元胞耦合,当心脏处舒张状态时,元胞的邻域半径为 R ,当心脏处于收缩状态时,在空间距离小于 d 的范围内细胞数量就会增加,相当元胞的邻域半径增大,因此我们用邻域半径交替变化描述心脏规则的收缩和舒张,同时认为心脏的收缩和舒张不改变元胞的激发阈值.在下面的数值模拟中,让元胞的邻域半径在 R_1 和 R_2 之间交替变化,假设 $S_{th,c}^1$ 是邻域半径 R_1 对应的临界激发阈值, $S_{th,c}^2$ 是邻域半径 R_2 对应的临界激发阈值.首先取 $R = R_1$ 且 $S_{th} \leq S_{th,c}^1$,在系统中产生螺旋波作为初态,然后让元胞的邻域

半径在 R_1 和 R_2 之间做如下交替变化:

$$R = \begin{cases} R_1, & \text{if } t \in \left[nT, nT + \frac{T}{2} - 1 \right] \\ R_2, & \text{if } t \in \left[nT + \frac{T}{2}, (n+1)T \right] \end{cases}, \quad (2)$$

式中 n 取自然数, T 为交替周期,这里考虑心脏收缩和舒张时间各占一半时间,元胞激发阈值不变.考虑到当 S_{th} 远小于临界阈值 $S_{th,c}$ 时,螺旋波的周期为 $T_0 = 8$,与元胞状态数相同,在数值模拟中,交替周期取 $T = 16, 8, 4$,邻域半径取值范围为 $R_1, R_2 \in [2, 8]$,研究不同 R_1, R_2 和 S_{th} 对螺旋波的影响.

首先考虑 $T = 16$ 的情况.在这种情况下,我们观察到螺旋波不受影响、螺旋波漫游、螺旋波消失和时空混沌态等现象,见图 6. 一般有: 1) 当 $S_{th} \leq S_{th,c}^2$ 时,如果参数 (R_1, S_{th}) 和参数 (R_2, S_{th}) 都对应为稳定螺旋波参数,则螺旋波的状态几乎不受交替影响,仍为稳定螺旋波,如果参数 (R_1, S_{th}) 和参数 (R_2, S_{th}) 有一组为漫游螺旋波参数(即在图 1 的区域 3 取值),则交替后观察到漫游螺旋波; 2) 当 $S_{th} > S_{th,c}^2$ 时,初态为稳定螺旋波,大多数情况下观察到螺旋波破碎现象,若 S_{th} 比 $S_{th,c}^2$ 稍大,则螺旋波破碎后大部分情况下出现时空混沌态,因为当系统处于 $R = R_2$ 阶段时,介质的激发性较低,导致螺旋波的波臂折断,形成很多小波.若 S_{th} 比 $S_{th,c}^2$ 大许多时,那么系统很快回到静息态,因为当系统处于 $R = R_2$ 阶段时,介质的激发性很低,无法维持波的传播.

图 6 给出的在 $T = 16$ 和不同邻域半径 R_1 下 R_2 - S_{th} 平面上的相图,图中的符号分别对在给定一组参数下介质中出现的现象.假设出现稳定螺旋

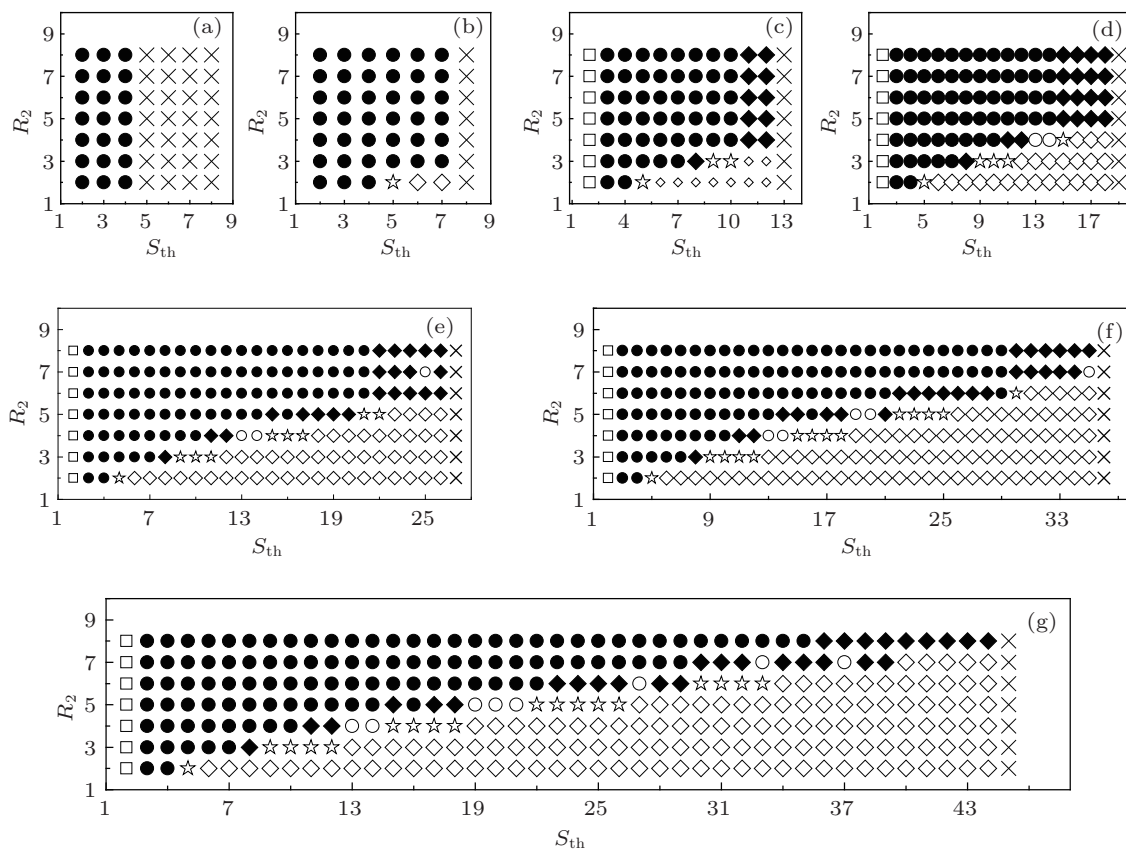


图6 在 $T = 16$ 和不同 R_1 下 R_2 - S_{th} 平面上的相图 (a) $R_1 = 2$; (b) $R_1 = 3$; (c) $R_1 = 4$; (d) $R_1 = 5$; (e) $R_1 = 6$; (f) $R_1 = 7$; (g) $R_1 = 8$; ● 对应稳定螺旋波, ◆ 对应漫游螺旋波, ○ 对应螺旋波漫游出系统形成的静息态, ◇ 对应螺旋波破碎形成的静息态, ☆ 对应时空混沌态, × 对应不能产生螺旋波初态, □ 对应激发性太高, 系统不能产生单一螺旋波

波、漫游螺旋波、时空混沌态和静息态的参数组个数分别为 N_1, N_2, N_3, N_4 , 总的参数组个数为 N , 则可以用四个参数 $\gamma_1 = \frac{N_1}{N}$, $\gamma_2 = \frac{N_2}{N}$, $\gamma_3 = \frac{N_3}{N}$ 和 $\gamma_4 = \frac{N_4}{N}$ 来反映心脏的收缩和舒张对螺旋波的影响, 其中 γ_1 反映心脏处于正常工作的概率, 表现为无心脏病; γ_2 反映心脏发生心力衰竭的概率, 因为只有当介质激发性较低时才会导致螺旋波漫游, 因此可以认为, 当心脏的激发性不够时, 可引起心肌收缩能力减弱, 导致心脏的血液输出量减少, 不足以满足机体的需要, 这种现象就是心力衰竭; γ_3 反映心脏发生心颤的概率, 因为研究表明心颤与螺旋波破碎成时空混沌有关; γ_4 反映心肌细胞无法正常激发而导致死亡的概率. 根据图 6 的结果, 我们得到这四个参数随 R_1 变化如图 7 所示. 从图 6 和图 7 可以看出, 当 $R_1 = 2$ 时, 邻域半径交替对螺旋波没有影响, 说明一个健康的的心脏, 心脏的收缩和舒张不影响动作电位变化. 但是随着 R_1 的增大, 心脏老年化越来越严重, 心脏维持正常工作的概率由 100% 线性减少到约 36.2%, 同时患心力衰竭的风险先由 0 增加到约 16%, 然后减少到约 9.6%, 患心颤概率由 0 缓慢增加到 6%, 特别是因心脏病死亡的概率由 0

线性增加到约 43.2%.

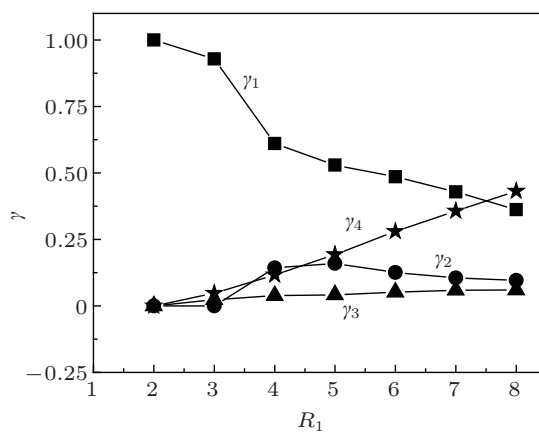


图7 在 $T = 16$ 情况参数 γ 随 R_1 的变化

应当指出, 某些参数下, 邻域半径交替变化会导致波臂的宽度出现明显的交替变化现象, 图 8 和图 9 分别给出了螺旋波和时空混沌的时间演化斑图. 从图可以看出, 波臂的宽度交替变化, 就像心脏的动作电位按 ABAB 方式变化, 这种现象称为交替. 可见随着心脏老年化, 心脏的收缩和舒张会导致交替现象发生.

下面在 $T = 4, 8$ 的情况下研究不同 R_1, R_2 和 S_{th} 对螺旋波的影响. 模拟结果表明, $T = 4, 8$ 时出现的现象与 $T = 16$ 大致相同, 在 $T = 16$ 情况下出现的现象, 在 $T = 4, 8$ 情况下同样出现, 只是邻域半径交替变化得越快, 螺旋波就越稳定, 系统回到静息态的情况相应会减少. 例如当 $S_{th} = 6, R_1 = 8, R_2 = 2$ 时, 如果 $T = 16$, 则系统演化到静息态, 但是当 $T = 8$ 时, 则系统不能完全演化到静息态, 在系统的边界有余波存在. 当 $T = 4$ 时, 螺旋波波臂折段后, 不会导致螺旋波完全破碎, 出现局部破碎的螺旋波, 如图 10(a) 所示. 当 $T = 4, 8$ 时, 我们还发现了锯齿状螺旋波, 如图 10(b)—(d) 所示. 为了了解在 $T = 4, 8$ 情况下邻域半径交替变化对螺旋波的影响,

我们在图 11 中给出在 $T = 4, 8$ 下参数 γ 随 R_1 的变化, 心脏发生各种情形的概率与 $T = 16$ 时大致相同. 当 $T = 4$ 时, 随着 R_1 的增大, 心脏维持正常工作的概率由 100% 几乎线性减少到约 43.2%, 患心力衰竭的风险由 0 增加到约 11%, 患心颤概率先由 0 增加到 1.5%, 然后缓慢减少到 0.33%, 患死亡概率由 0 线性增加到约 42.8%. 当 $T = 8$ 时, 随着 R_1 的增大, 心脏维持正常工作的概率由 100% 几乎线性减少到约 44.8%, 同时患心力衰竭的风险先由 0 增加 8.6%, 然后减少到约 6.6%, 患心颤概率由 0 先增加到 2.85%, 然后缓慢减少到 2.65%, 而死亡的概率由 0 增加到约 43.2%.



图 8 在 $S_{th} = 21, R_1 = 8, R_2 = 6$ 下不同时步的 u 变量斑图 (a) $t = 5000$; (b) $t = 5008$; (c) $t = 5016$

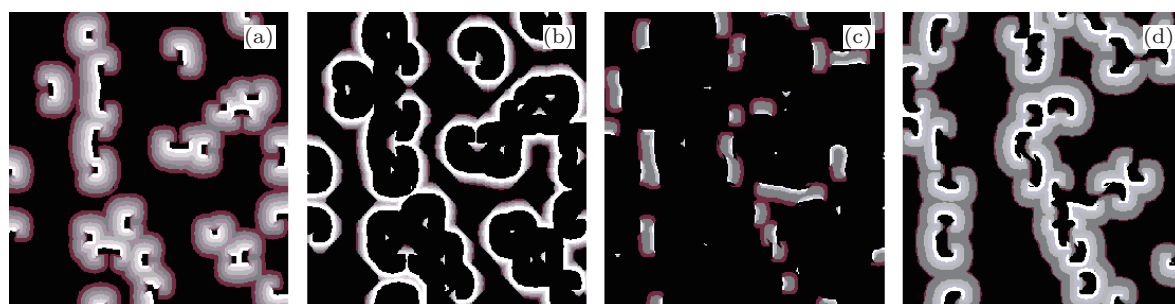


图 9 在 $S_{th} = 11, R_1 = 6, R_2 = 3, T = 16$ 下不同时步的 u 变量斑图 (a) $t = 5000$; (b) $t = 5006$; (c) $t = 5012$; (d) $t = 5018$

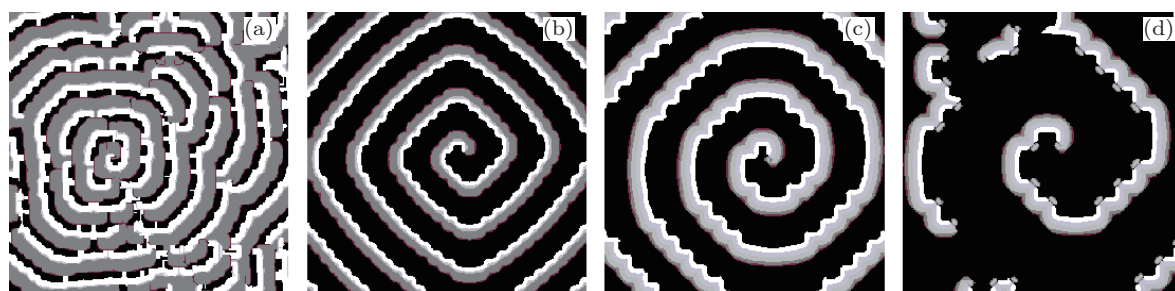
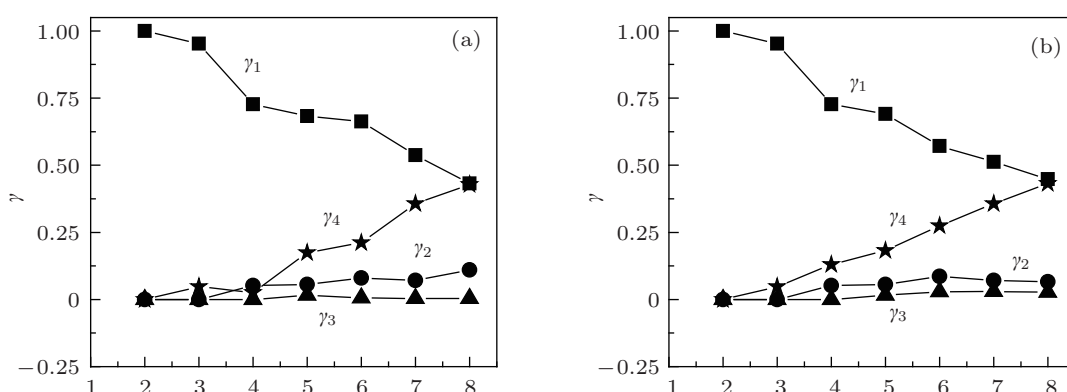


图 10 在不同参数下的螺旋波斑图 (a) $S_{th} = 6, R_1 = 8, R_2 = 2, T = 4$; (b) $S_{th} = 11, R_1 = 6, R_2 = 3, T = 4$; (c) $S_{th} = 10, R_1 = 7, R_2 = 3, T = 8$; (d) $S_{th} = 11, R_1 = 7, R_2 = 3, T = 8$

图 11 在不同 T 情况参数 γ 随 R_1 的变化 (a) $T = 4$; (b) $T = 8$

5 讨论与结论

本文研究了心脏老化和有规律收缩对螺旋波的影响. 发现心脏老化可导致螺旋波发生漫游和无法在介质中产生螺旋波, 导致波速减小, 既可导致螺旋波波长变长和周期变大, 也可导致螺旋波的波长变短和周期不变; 心脏老化和有规律收缩两个因素共同作用, 会导致呼吸螺旋波、螺旋波破碎和消失现象, 因此心脏可能出现交替现象. 随着心脏老年化 (R 和 S_{th} 增大), 成人无心脏病问题的概率几乎线性减少, 同时死亡发生概率几乎线性增加; 患心力衰竭概率的变化有两种情况, 一种是先增加后缓慢减少, 另一种情况是一直增加, 心颤发生概率的变化与患心力衰竭概率的变化相似.

我国的心衰流行病学调查结果表明 [24]: 35—44 岁、45—54 岁、55—64 岁、65—74 岁年龄组的心衰患病率, 男性分别为 0.3%, 0.6%, 1.3%, 1.0%, 女性分别 0.5%, 1.3%, 1.4%, 1.5%, 可见心力衰竭发病率并非线性增加, 我们的结果也显示心力衰竭发

病率并非随心脏老年化线性增加. 美国的统计资料显示 [24,25], 心力衰竭主要是中老年疾病, 50 岁人群的发病率为 1%, 65 岁以上的人群患心力衰竭的概率为 6%—10%, 在 45—94 岁年龄段, 年龄每增加 10 岁, 心衰的发病率约翻一番. 我们得到的结果是: 患心力衰竭的概率在 [6.6%, 16%] 之间变化 (三种情况的综合). 我国的房颤流行病学调查结果表明 [26]: 30—39 岁、40—49 岁、50—59 岁、60—69 岁、70—79 岁、80—89 岁年龄组的心衰患病率分别为 0, 0.2%, 0.5%, 1.3%, 3.1%, 7.5%, 我们的结果是, 患心颤的概率在 [0.33%, 6%] 之间变化 (三种情况的综合). 美国 Framingham 研究 (1948 年启动的一项心脏研究, 研究所在美国的 Framingham 小镇) 显示 [27], 对于男性, 年龄增加 10 岁, 死亡概率增加 27%; 对于女性, 年龄增加 10 岁, 死亡概率增加 61%. 我们的结果是, 死亡概率随心脏老化线性增加. 这些结果表明 GH 模型可以用来定性研究心脏老化问题.

- [1] Zaikin A N, Zhabotinsky A M 1970 *Nature* **225** 535
 [2] Bär M, Gottschalk N, Eiswirth M, Ertl G 1994 *J. Chem. Phys.* **100** 1202
 [3] Witkowski F X, Leon L J, Penkoske P A, Giles W R, Spanoll M L, Ditto W L, Winfree A T 1998 *Nature* **392** 78
 [4] Fenton F H, Cherry E M, Hasting H M, Evans S J 2002 *Chaos* **12** 852
 [5] Qian Y, Song X Y, Shi W, Chen G Z, Xue Y, 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 4420 (in Chinese) [钱郁, 宋宣玉, 时伟, 陈光旨, 薛郁 2006 物理学报 **55** 4420]
 [6] Liu F C, Wang X F, Li X C, Dong L F 2007 *Chin. Phys.* **16** 2640
 [7] 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]
 [8] Ma J, Jin W Y, Yi M, Li Y L 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 2832 (in Chinese)

- [马军, 靳伍银, 易鸣, 李延龙 2008 物理学报 **57** 2832]
 [9] Liu Y, Li S R, Ma J, Ying H P 2009 *Chin. Phys. B* **18** 98
 [10] 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]
 [11] Bär M, Eiswirth M 1993 *Phys. Rev. E* **48** 1635
 [12] 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]
 [13] Wang S H, Choe W G, Lee K J 2000 *Phys. Rev. E* **62** 4799
 [14] 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]
 [15] Gan Z N, Ma J, Zhang G Y, Chen Y 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 5400 (in Chinese) [甘正宁, 马军, 张国勇, 陈勇 2008 物理学报 **57** 5400]

- [16] Ma J, Wang C N, Jin W Y, Li Y L, Pu Z S 2008 *Chin. Phys. B* **17** 2844
 [17] Yang J Z, Zhang M 2005 *Chin. Phys. Lett.* **22** 3195
 [18] 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]
 [19] Zhang H, Ruan X S, Hu B, Ouyang Q 2004 *Phys. Rev. E* **70** 016212
 [20] Zhang H, Li B W, Sheng Z M, Cao Z J, Hu G 2006 *Europhys. Lett.* **76** 1109
 [21] Olivetti G, Melissari M, Capasso J M, Anversa P 1991 *Circ. Res.* **68** 1560
 [22] Greenberg J M, Hastings S P 1978 *SIAM J. Appl. Math.* **34** 515
 [23] Kohl P, Camelliti P, Burton F L, Smith G L 2005 *J. Electrocardiology* **38** 45
 [24] Gu D F, Huang G Y, He J, Wu X G, Duan X F, Stephen M M, Paul K W 2003 *Chin. J. Cardiology* **31** 3 (in Chinese) [顾东风, 黄广勇, 何江, 吴锡桂, 段秀芳, Stephen M M, Paul K W 2003 中华心血管病杂志 **31** 3]
 [25] Wang L 2011 *South China Journal of Cardiovascular Diseases* **17** 178 (in Chinese) [王林 2011 岭南心血管病杂志 **17** 178]
 [26] Zhou Z Q, Hu D Y, Chen J, Zhang R H, Li K B, Zhao X L 2004 *Chin. J. Intern. Med.* **43** 491 (in Chinese) [周自强, 胡大一, 陈捷, 张仁汉, 李奎宝, 赵秀丽 2004 中华内科杂志 **43** 491]
 [27] Kannel W B, Ho K, Thom T 1994 *Br. Heart J.* **72** (Supplement) S 3

Effects of the aging and systole of heart on the dynamics of spiral wave*

Liu Hai-Ying¹⁾²⁾ Yang Cui-Yun^{2)†} Tang Guo-Ning^{1)‡}

1) (College of Physics and Technology, Guangxi Normal University, Guilin 541004, China)

2) (Department of Physics and Information Technology, Guilin Normal College, Guilin 541002, China)

(Received 7 June 2012; revised manuscript received 21 July 2012)

Abstract

In this paper, the effects of the aging and systole of heart on the dynamics of spiral wave are studied by using the Greenberg-Hasting cellular automaton model. In this model the neighbor radius and the excitation threshold are increased in order to simulate the aging of heart, and the neighbor radius is changed alternately to simulate heart systole and diastole. The results show that the aging of heart can induce some influences on spiral wave, such as make spiral wave meandering, and even cause spiral wave to disappear; in addition, it can shorten the wavelength and keep period fixed, and also elongate the wavelength and increase the period of spiral wave. If the aging and the regular systole of heart take place at the same time, we observe some phenomena, such as different spiral wave patterns, the spiral wave breakup and disappearance. We also obtain the probabilities of heart failure, ventricular fibrillation and death. These results are essentially consistent with the results of relevant epidemiological survey.

Keywords: discrete excitable medium, spiral wave, the neighbor radius, the excitation threshold

PACS: 05.45.-a, 87.18.Hf

DOI: 10.7498/aps.62.010505

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11165004), and the Education Department of Guangxi Zhuang Autonomous Region, China (Grant No. 201106LX699).

† Corresponding author. E-mail: yangcuiyun_g1@foxmail.com

‡ Corresponding author. E-mail: tangguoning@sohu.com