

分子马达不等间距四态跃迁模型*

展永¹⁾ 吴魏霞^{1)**} 赵同军^{1,2)} 关荣华¹⁾ 梅俊平¹⁾

(¹⁾河北工业大学理学院, 天津 300130; ²⁾河北工业大学电器工程学院, 天津 300130)

摘要 用主方程方法研究分子马达一维周期性四态不等间距随机跃迁模型, 得出稳态情况下分子马达的漂移速度 V 、扩散系数 D 及随机参数 r , 将三者随 ATP 的浓度 $[ATP]$ 及外力 F 的变化进行了曲线拟合, 并同大量实验结果进行了比较, 定性半定量地分析了分子马达在拖动负载运动时的动力学行为。

关键词 分子马达, 跃迁模型, 随机参数

学科分类号 Q615

马达蛋白 (motor protein) 或分子马达 (molecular motor) 是一类具有运动功能的重要蛋白质^[1~3]。这类蛋白质也是一种 ATP 酶, 可催化 ATP 水解, 并可高效地将 ATP 水解释放的化学能直接转化为机械能, 产生协调的定向运动而做功^[4~6]。近几年来, 在研究分子马达沿周期性轨道的定向运动中^[7~9], 随机方法被广泛应用, 一系列随机跃迁模型相继建立。Kolomeisky 等^[5]用此方法研究了两态周期跃迁模型, 而实际的分子马达具有相当复杂的生物结构, 在力学和化学相互作用周期中构象发生了变化, 经历了多个中间态, 而两态模型没有考虑构象的变化, 故不能充分描述这一过程。目前, 分子马达在一个力学化学周期中经历了四个中间态被认为是比较合理的。为此, 本文建立了更接近实际的随机四态跃迁模型, 得出稳态情况下分子马达的漂移速度 V 、扩散系数 D 以及描述其随机性质的随机参数 r 。目前关于分子马达的随机跃迁模型大多假定其在任意相邻两态之间的跃迁为等间距跃迁, 即各步长均相等。但实验发现^[8~10], 分子马达的运动并不是简单的等间距跃迁, 在拖动负载运动, 即有外力作用时, 各分步长 d_j ($j=1, 2, 3, 4$) 一般不相等, 外力对各跃迁速率的影响程度也不同。本文引入外力分配系数 θ_j^+ 和 θ_j^- 来表征外力对各跃迁速率的影响程度, 并将漂移速度 V 和随机参数 r 随 ATP 的浓度 $[ATP]$ 及外力 F 的变化拟合曲线同实验进行了比较, 分析了分子马达在拖动负载运动时的各种动力学行为, 为研究实际分子马达的定向运动机制提供了一种更为可行的理论模型和方法。

1 物理模型及主方程方法

分子马达沿微管 (或微丝) 作持续随机性定向运动, 比如单个驱动蛋白 (kinesin) 就可以在微管表面走上百步而不脱离, 故可将分子马达沿轨道的运动看成一维运动。又因每个微管在结构上具有长度为 8 nm 的周期性, 而分子马达 (kinesin) 沿微管的运动是一步一步进行的, 每一步的长度为 8 nm, 这与微管原纤维的结构周期性一致, 故分子马达的运动具有周期性。此外, 分子马达沿微管运动的能量来源于 ATP 水解释放的化学能, ATP 水解过程中伴随着力的产生, 这样, 分子马达的运动过程就是化学与力学的耦合过程。在整个力学化学周期过程中, 经历了若干中间态。此周期过程为: 分子马达与微管的复合体 $M \cdot K$ 首先结合 1 个 ATP 形成 $M \cdot K \cdot ATP$ 态, 然后 ATP 水解为 ADP 和 P_i (无机磷) 形成 $M \cdot K \cdot ADP \cdot P_i$ 态, 接着释放掉 P_i 形成 $M \cdot K \cdot ADP$ 态, 最后释放掉 ADP 又回到 $M \cdot K$ 态。分子马达与微管的复合体回到初态, 但已沿微管走了 8 nm 的长度, 这样就完成了一个力学化学周期。当此复合体再次结合 ATP 时, 开始下一个力学化学周期。上面的 M 代表微管, K 代表分子马达, “ $\cdot$ ” 表示 ATP 分子与分子马达结合形成复合体。这样, 将一个连续的力学化学周期过程用分离的四个态来表示。分子马达在这四个态之

* 国家自然科学基金资助项目 (10075007)、河北省自然科学基金项目 (198027) 和河北省博士基金项目 (00547001D)。

** 通讯联系人。

Tel: 022-26564802, 26545433, E-mail: wuweixia@eyou.com

收稿日期: 2002-10-29, 接受日期: 2003-01-10

间随机跃迁, 并由相应的生物化学速率常数 (或跃迁速率常数) 描述. 总之, 将分子马达沿微管的运动看成是一维周期性四态随机跃迁运动. 一般来说, 分子马达沿轨道的运动可分 3 种情况: 空间位置不变, 只有化学态的转化; 化学态不变, 只有空间位置上的移动; 空间位置与化学态同时变化, 但位置上的变化一般是不等间距的. 同时, 等间距跃迁情况与实验的观测结果^[8-10] 也不相符. 所以为了更符合实际的生物化学过程, 本文考虑相邻两态之间的跃迁为不等间距的情况. 如图 1 所示. x 轴上的周期为 4. 总步长为 d , 各分步长为 d_j ($j =$

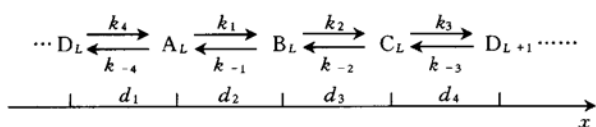


Fig. 1 A schematic diagram for the stochastically unequal interval hopping four state kinetic model of a molecular motor. L represents the different period. A, B, C and D represent the four different states respectively which are $M \cdot K$, $M \cdot K \cdot ATP$, $M \cdot K \cdot ADP \cdot Pi$ and $M \cdot K \cdot ADP$. d_j ($j = 1, 2, 3, 4$) represents sequentially the substep. $k_{\pm 1}$, $k_{\pm 2}$, $k_{\pm 3}$ and $k_{\pm 4}$ are the eight transition rate constants. x represents the one-dimension microtubule. Allowed transitions are indicated by the arrows.

1, 2, 3, 4). 显然, 分子马达在一个周期中的总步长等于各分步长之和, 即 $d = d_1 + d_2 + d_3 + d_4$. 下标 L 指不同的化学周期. 值得注意的是, 此种情况下的力学态和化学态并不是一一对应, D_L 和 D_{L+1} 在构象上完全相同, 即化学态相同, 但力学态不同. 所以这里的步长 d 是经过一个化学周期后, 分子马达沿轨道所走的位移.

分子马达沿微管随机跃迁, 在 t 时刻处于 x 位置的几率分布为 $p_x(t)$, 则 $p_x(t)$ 满足主方程^[5]:

$$\frac{\partial p_x(t)}{\partial t} = W_{x, x+1} p_{x+1}(t) + W_{x, x-1} p_{x-1}(t) - (W_{x+1, x} + W_{x-1, x}) p_x(t) \quad (1)$$

其中, W_{ij} 代表单位时间内从 j 态跳到 i 态的跃迁速率常数. 在四态模型中, W_{ij} 可表示为:

$$W_{x+1, x} = k_n, \quad W_{x, x+1} = k_{-n} \quad (x = 4k + n, n = 1, 2, 3, 4, k \in Z) \quad (2)$$

且 $p_x(t)$ 满足归一化条件:

$$\sum_x p_x(t) = 1 \quad (\text{对所有的 } t) \quad x \in (-\infty, \infty) \quad (3)$$

四态情况下, 描述随机跃迁过程的主方程为:

$$\begin{aligned} \frac{\partial p_x(t)}{\partial t} &= - (k_{-4} + k_1) p_x(t) + k_{-1} p_{x+d_2}(t) + k_4 p_{x-d_1}(t) \quad (x = 4k + d_1) \\ \frac{\partial p_x(t)}{\partial t} &= k_1 p_{x-d_2}(t) - (k_{-1} + k_2) p_x(t) + k_{-2} p_{x+d_3}(t) \quad (x = 4k + d_1 + d_2) \quad (k \in Z) \\ \frac{\partial p_x(t)}{\partial t} &= k_2 p_{x-d_3}(t) - (k_{-2} + k_3) p_x(t) + k_{-3} p_{x+d_4}(t) \quad (x = 4k + d_1 + d_2 + d_3) \\ \frac{\partial p_x(t)}{\partial t} &= k_{-4} p_{x+d_1}(t) + k_3 p_{x-d_4}(t) - (k_{-3} + k_4) p_x(t) \quad (x = 4k) \end{aligned} \quad (4)$$

分子马达沿微管作随机跃迁运动, 几率随时间经短时期内波动后会达到稳态, 对其进行的各种实验也是在稳态的基础上观察, 因此研究分子马达的稳态特征尤为重要. 下面为对其稳态行为的研究.

稳态时, 各位置几率不再随时间变化, 即方程 (4) 中各式为零. 则此时分子马达的漂移速度 V 、扩散系数 D 和描述其随机性质的随机参数 r 分别为^[6]:

$$V = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{d}{dt} \langle x(t) \rangle = \frac{4}{r_1 + r_2 + r_3 + r_4} \left[1 - \frac{k_{-1} k_{-2} k_{-3} k_{-4}}{k_1 k_2 k_3 k_4} \right] \quad (5)$$

$$\begin{aligned} D &= \frac{1}{2} \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{d}{dt} [\langle x^2(t) \rangle - \langle x(t) \rangle^2] \\ &= \frac{1}{(r_1 + r_2 + r_3 + r_4)^2} \{ V [s_1(r_2 + 2r_3 + 3r_4 + 4r_1) + s_2(r_3 + 2r_4 + 3r_1 + 4r_2) + s_3(r_4 + 2r_1 + 3r_2 + 4r_3) + s_4(r_1 + 2r_2 + 3r_3 + 4r_4)] + 4(k_1 r_1 s_1 + k_2 r_2 s_2 + k_3 r_3 s_3 + k_4 r_4 s_4) \} - 3V \end{aligned} \quad (6)$$

$$r = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{\langle x^2(t) \rangle - \langle x(t) \rangle^2}{\langle x(t) \rangle d} = \frac{2D}{dV} \quad (7)$$

其中 $x(t)$ 代表 t 时刻分子马达在 x 轴上所处的位置, $\langle x(t) \rangle$ 代表 t 时刻所处位置的随机平均, 即平均位置:

$$\langle x(t) \rangle = \sum_{x=-\infty}^{\infty} x p_x(t) \quad (8)$$

d 代表分子马达沿微管在一个周期内走的步长. r_x, s_x ($x = 1, 2, 3, 4$) 分别为:

$$r_x = \frac{1}{W_{x+1,x}} \left(1 + \sum_{k=1}^3 \prod_{j=1}^k \frac{W_{x+j-1,x+j}}{W_{x+j,x+j}} \right)$$

$$s_x = \frac{1}{W_{x+1,x}} \left(1 + \sum_{k=1}^3 \prod_{j=1}^k \frac{W_{x-j,x+1-j}}{W_{x+1-j,x-j}} \right) \quad (9)$$

分子马达在拖动负载运动, 即当施加一个与马达定向运动方向相反的力时, 它的各跃迁速率将会受到不同程度的影响. 为了体现这种影响程度的大小, 我们引入外力分配系数 θ_j^+ 和 θ_j^- 来分别表征外力在向前和向后跃迁速率之间的分配. 在准平衡态假设下, 分子马达的跃迁速率与外力的关系为:

$$k_j(F) = k_j^0 e^{-\theta_j^+ F d / k_B T},$$

$$k_{-j}(F) = k_{-j}^0 e^{-\theta_j^- F d / k_B T} \quad (j = 1, 2, 3, 4) \quad (10)$$

其中 $k_{\pm j}^0$ 为外力 $F = 0$ 时的跃迁速率, k_B 为玻尔兹曼常数, T 为绝对温度, d 为分子马达经过一个化学周期沿轨道移动的位移, 即步长. θ_j^+ 和 θ_j^- 的符号不必都相同, 但总系数

$$\theta = \sum_{j=1}^4 \theta_j^+ + \theta_j^- \quad (11)$$

应该为正, 这样才能保证外力的方向与分子马达定向运动的方向相反, 马达克服外力做功. 当没有 ATP 激活时, 分子马达在热平衡条件下也会作扩散运动, 此时细致平衡条件要求 $\theta = 1$. 作为对准平衡态假设的一个补充, 对处于平衡态附近被激活的分子马达来说, $\theta = 1$ 也是合理的.

当分子马达在相邻两态的跃迁为不等间距时, 各分步长、总步长与外力分配系数之间的关系为:

$$d_j = (\theta_j^+ + \theta_{j+1}^-) d \quad (12)$$

由上式可知, $\theta_j^+ + \theta_{j+1}^-$ 越大, 与之相应的分步长就越大, 外力对相应跃迁速率的影响程度就越大, 反之越小.

2 计算与分析

经过一段时间后, 分子马达沿轨道的运动将达到稳态, 其漂移速度 V 、扩散系数 D 及随机参数 r 均不再随时间变化. 下面对 $V(F, [ATP])$ 、

$r(F, [ATP])$ 及 $D(F, [ATP])$ 进行数值拟合, 并与实验作比较, 定量及定性地分析分子马达沿微管运动的动力学行为. 最新的实验表明^[11]: Kinesin 沿微管运动中, 每个 8 nm 的步长可分为相互交替的两步来进行, 第一步走 2 nm, 第二步走 6 nm. 此外, 文献 [11] 指出, 除了正向第一步 (ATP 的结合) 的跃迁速率和所有逆向的跃迁速率对外力明显依赖外, 其余步的跃迁速率对外力的依赖均不明显. 据此, 可以假设 $d_1 = 2$ nm, $d_2 = d_3 = 0$, $d_4 = 6$ nm, 相应的 $\theta_1^+ + \theta_1^- = 0.25$, $\theta_2^+ + \theta_2^- = \theta_3^+ + \theta_3^- = 0$, $\theta_4^+ + \theta_4^- = 0.75$. 近来, Block 等在 $F = 1 \sim 8$ pN, $[ATP] = 1 \times 10^{-3} \sim 2$ mmol/L 范围内对沿微管运动的单个 kinesin 进行了观察, 并对漂移速度 V 及随机参数 r 进行了测量. 文献 [10] 对单体果蝇的驱动蛋白 K341 进行化学实验, 观测出各跃迁速率为:

$$k_1^0 = 20[ATP](\mu\text{mol/L})^{-1} \cdot \text{s}^{-1},$$

$$k_2^0 > 300 \text{ s}^{-1}, k_3^0 = 80 \text{ s}^{-1}, k_4^0 = 300 \text{ s}^{-1},$$

$$k_{-1}^0 = 200 \text{ s}^{-1} \quad (13)$$

由于逆跃迁速率 k_{-2}^0 、 k_{-3}^0 和 k_{-4}^0 均非常小, 故实验上无法观测. 图 2 为 K341 的化学循环示意图.

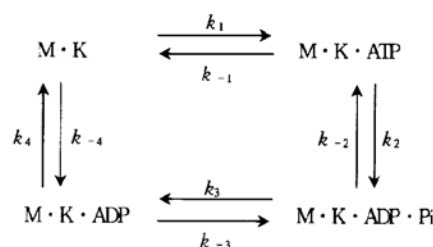


Fig 2 A schematic diagram for the chemical cycle of a monomeric *Drosophila* kinesin K341

M, K, “·”, $k_{\pm j}$ and arrows are similar to Fig. 1.

我们将 (13) 式的各值作为参照值, 在不同的外力 F 及 $[ATP]$ 下, 利用公式 (5) ~ (12) 中漂移速度 V 、扩散系数 D 、随机参数 r 及各跃迁速率常数之间的关系, 并注意到: 只有正向第一步的跃迁速率常数 k_1 与 $[ATP]$ 有关, 关系为 $k_1 = k_1^0 [ATP]$, 对 Block 得出的数据进行拟合, 得出与实验 $V(F, [ATP])$ 及 $r(F, [ATP])$ 相符最佳的各跃迁速率值为:

$$k_1^0 = 20[ATP](\mu\text{mol/L})^{-1} \cdot \text{s}^{-1}, k_2^0 = 750 \text{ s}^{-1},$$

$$k_3^0 = 300 \text{ s}^{-1}, k_4^0 = 300 \text{ s}^{-1}, k_{-1}^0 = 250 \text{ s}^{-1},$$

$$k_{-2}^0 = 15 \text{ s}^{-1}, k_{-3}^0 = 1 \text{ s}^{-1}, k_{-4}^0 = 1 \text{ s}^{-1}, \theta_1^+ = 0.1,$$

$$\theta_1^- = 0.15, \theta_2^+ = \theta_2^- = \theta_3^+ = \theta_3^- = 0,$$

$$\theta_4 = 0.04, \theta_1 = 0.71 \quad (14)$$

将上述值与 (13) 中的各值进行比较, 可看出个别值相差较大, 其主要原因为: 实验选取的分子马达种类不同, 而不同种类的 kinesin 在结构与动力学行为上也必然表现出多样性. 从图 3 可看出, 当外力 F 一定时, 在 $[ATP]$ 水平很低的范围内, 漂

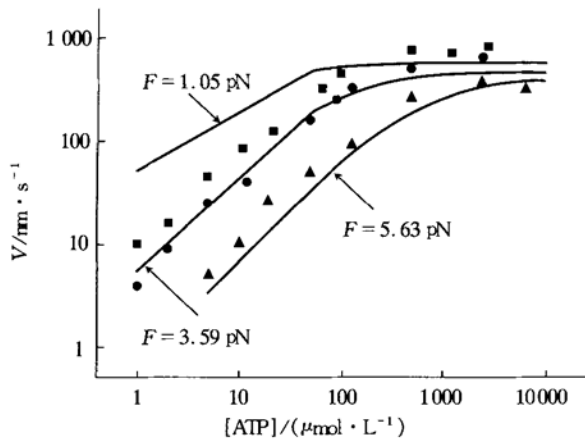


Fig. 3 The drift velocity V as a function of $[ATP]$ under fixed F

■, ● and ▲ represents the experimental data for $F = 1.05, 3.59$ and 5.63 pN, respectively. The solid lines are corresponding fits.

移速度 V 与 $[ATP]$ 成正比, 当 $[ATP]$ 到达一定限度时, V 将达到最大值, 且 V 满足 Michaelis-Menten 方程: $V = V_{max} [ATP] / (k_M + [ATP])$. 由于 k_1 (ATP 结合) 与 k_{-1} (ATP 释放) 均明显依赖于外力, 且 70% 的外力; 当外力 F 增大时, 分子马达所能到达的最大速度在减小, 而 Michaelis 常数 k_M 却随之增大. V_{max} 和 k_M 的变化是分配给 k_{-1} [11], 这样外力的存在减弱了分子马达与 ATP 的结合能力, 导致定向漂移的最大速度减小. 从图 4 可看出: a. $[ATP]$ 一定时, 随着 F 的增大, V 减小. 这是因为 F 的增大使得马达与 ATP 分子的结合能力减弱, 由 ATP 水解释放的能量减少, 马达的速度 V 也就随之减小. b. 在不同的 $[ATP]$ 下, V - F 关系曲线表现出不同的形状. 在 $[ATP]$ 较低时, V 和 F 几乎呈线性关系, 使分子马达停止运动时的外力 F_s 约为 $5.5 \sim 6$ pN, 而在饱和 $[ATP]$ 下, V - F 关系曲线呈非线性, 且是上凸的, F_s 约为 7 pN. 这是因为 $[ATP]$ 较小时, 随着 F 的线性增加, 与马达结合的 ATP 分子就线性减少, 使得马达的速度 V 也线性减小.

在饱和 $[ATP]$ 下, 当 F 为较小和中等时, 马达与 ATP 分子结合的能力较强, 故 V 减小缓慢, 当 F 较大时, 即使 ATP 分子饱和, 但马达与其结合的能力已严重减弱, V 减小较迅速. 故在饱和 $[ATP]$ 下, V - F 关系曲线呈非线性的上凸形状. F_s 的不同是由于 $[ATP]$ 较大时, 分子马达与 ATP 分子结合的几率大, 产生定向运动的力就大, 从而需更大的外力才能使之停止运动.

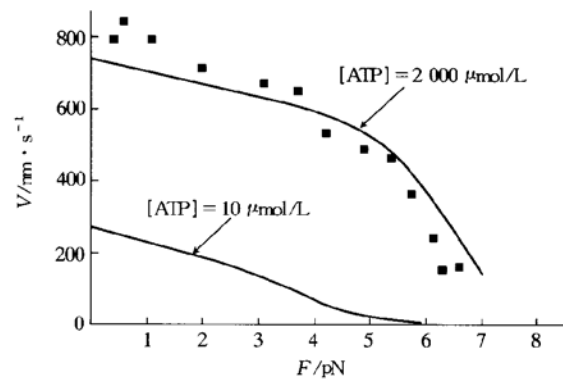


Fig. 4 The drift velocity V as a function of F under fixed $[ATP]$

■ represents the experimental data for $[ATP] = 2000 \mu\text{mol/L}$. The two solid lines, are fits for $[ATP] = 2000, 10 \mu\text{mol/L}$.

图 5 (a) 和 (b) 所示的随机参数 r 与 $[ATP]$ 的关系中, 在 $[ATP]$ 较低时, 拟合值小于实验值, 原因可能是由于没有考虑分子马达与轨道的脱离及侧链反应存在的结果, 而前者对 r 的影响尤其明显. 当 $[ATP]$ 接近于 0 时, 分子马达的漂移速度 V 几乎为 0, 其随机跃迁性就很大, r 的值可大于 1; 当 $[ATP]$ 逐渐增加时, 漂移速度 V 也随之增大, 其随机跃迁性就减小, 故 r 的值也减小. 当 $[ATP]$ 达到饱和时, 分子马达结合 ATP 分子的几率将稳定, 其漂移速度 V 也达到最大值而不再变化, 故 r 的值也趋于稳定. 但在饱和 $[ATP]$ 下, 较小的外力不足以使分子马达的定向运动发生很大变化, 所以 r 值增大不明显; 当外力足够大时, 在变化很小的范围内, 就能使分子马达的随机跃迁性明显增大, 故 r 也迅速增大. 这些变化的原因可能也是由于外力的存在使得分子马达与 ATP 分子的结合能力减弱, 及存在脱轨的可能性而造成 (图 6).

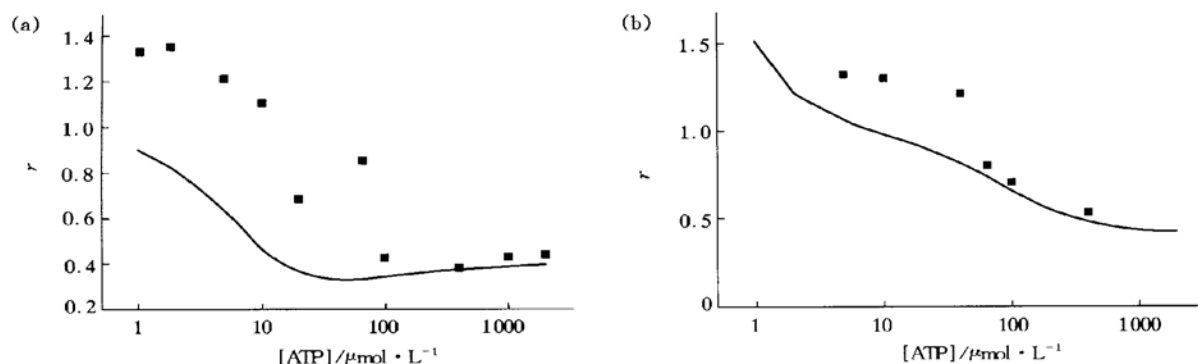


Fig. 5 The randomness r as a function of $[ATP]$ under fixed $F = 1.05$ pN (a) and $F = 3.59$ pN (b)

■ and the solid line are similar to the above.

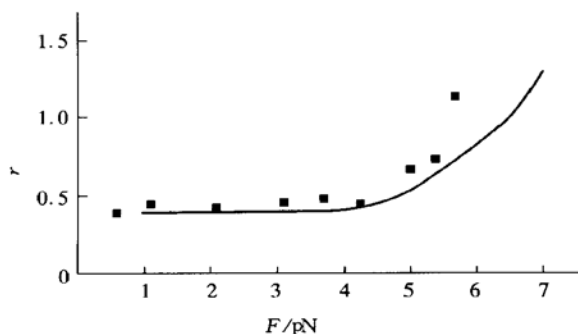


Fig. 6 The randomness r as a function of F under fixed $[ATP]$

$[ATP] = 2000 \mu\text{mol/L}$. ■ and the solid line are similar to the above.

在一定的外力下, D 随 $[ATP]$ 的增加而增大, 最后达到最大值. 在饱和 $[ATP]$ 下, D 随 F

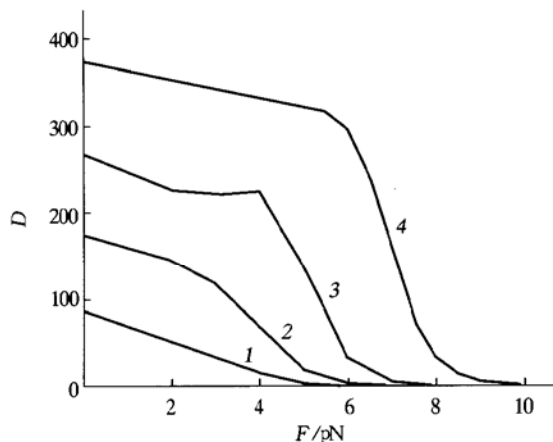


Fig. 7 The diffusion coefficient D as a function of F with $[ATP] = 1, 5, 50$ and $2000 \mu\text{mol/L}$ respectively

1: $[ATP] = 1 \mu\text{mol/L}$; 2: $[ATP] = 5 \mu\text{mol/L}$; 3: $[ATP] = 50 \mu\text{mol/L}$; 4: $[ATP] = 2000 \mu\text{mol/L}$.

的增大而减小. 这是因为, F 一定时, $[ATP]$ 的增加会使分子马达结合 ATP 分子的几率增大, 漂移速度 V 就会随之增大, 分子马达的扩散运动就加速, 故 D 就增大, 而在饱和 $[ATP]$ 下, F 的增大使得 $V_{\max}$ 减小, 扩散运动就会减慢, 故 D 减小 (图 7 和图 8). 这些都与由实验而作出的解释相符.

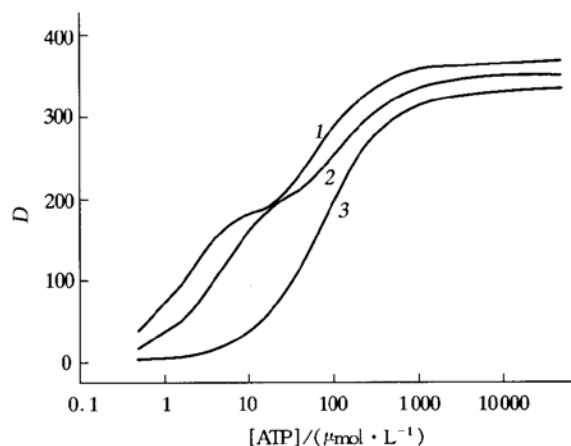


Fig. 8 The diffusion coefficient D as a function of $[ATP]$ with $F = 1, 3$ and 5 pN respectively

1: $F = 1$ pN; 2: $F = 3$ pN; 3: $F = 5$ pN.

3 结 论

利用随机主方程的方法研究分子马达的四态周期性不等间距随机跃迁模型, 给出了稳态情况下分子马达的漂移速度 V 、扩散系数 D 和随机参数 r , 并通过引入外力对 $V(F, [ATP])$ 、 $r(F, [ATP])$ 及 $D(F, [ATP])$ 进行曲线拟合, 与实

验作了比较, 对与实验偏差较大的曲线作了理论上的分析, 定性半定量地解释了分子马达定向运动的各种动力学行为. 由于分子马达的结构及所处的生物环境极其复杂, 本文所讨论的四态模型仍为简化情况, 与实际仍有很大的差距. 参数的设定及取值也有待于进一步研究. 在理论上应当将一维运动推向多维, 即考虑其横向运动、纵向运动、扭转以及它们之间的相互耦合作用, 实验上需提高实验精度, 提供更精确的数据及图像. 因此, 对分子马达定向运动机制的研究在理论和实验上仍需更深入.

参 考 文 献

- 1 Hirokawa N. Kinesin and dynein superfamily proteins and the mechanism of organelle transport. *Science*, 1998, **279** (5350): 519~ 526
- 2 Vale R D, Milligan R A. The way things move: looking under the Hood of molecular motor protein. *Science*, 2000, **288** (5463): 88~ 95
- 3 Schief W R, Howard J. Conformational changes during kinesin motility. *Current Opinion Cell Biology*, 2001, **13** (1): 19~ 28
- 4 Qian H. A simple theory of motor protein kinesin and energetics. *Biophys Chem*, 1997, **67** (1~ 3): 263~ 267
- 5 Kolomeisky A B, Widom B. A simplified "Ratchet" model of molecular motors. *J Stat Phys*, 1998, **93** (3/4): 633~ 645
- 6 Derrida B. Velocity and diffusion constant of a periodic one-dimensional hopping model. *J Stat Phys*, 1983, **31** (3): 433~ 450
- 7 Fisher M E, Kolomeisky A B. The force exerted by a molecular motor. *Proc Natl Acad Sci USA*, 1999, **96** (12): 6597~ 6602
- 8 Qian H. A simple theory of motor protein kinetics and energetics. II. *Biophys Chem*, 2000, **83** (1): 35~ 43
- 9 Fisher M E, Kolomeisky A B. Molecular motor and the force they exert. *Physica A*, 1999, **274** (1~ 2): 241~ 266
- 10 Gilbert S P, Moyer M I, Johnson K A. Pathway of ATP hydrolysis by monomeric and dimeric kinesin. *Biochemistry*, 1998, **37** (3): 800~ 813
- 11 Fisher M E, Kolomeisky A B. Simple mechanochemistry describes the dynamics of kinesin molecules. *Proc Natl Acad Sci*, 2001, **98** (14): 7748~ 7753

A Stochastically Unequal Interval Four-state Hopping Model of Molecular Motor^{*}

ZHAN Yong¹⁾, WU Wei-Xia^{1)**}, ZHAO Tong-Jun^{1,2)}, GUAN Rong-Hua¹⁾, MEI Jun-Ping¹⁾

¹⁾ School of Science, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China;

²⁾ School of Electrical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

Abstract The stochastic master equation approach to molecular motor's directed motion is used and a periodic one-dimensional four-state stochastically unequal interval hopping model is studied. The drift velocity V , the diffusion constant D and the randomness parameter r of the steady state are all be obtained. By comparing the simulated curve with experiment about drift velocity V , diffusion constant D and randomness parameter r versus [ATP] and external load F , the kinetic behaviors of a molecular motor under external load F are qualitatively analyzed.

Key words molecular motor, hopping model, randomness parameter

^{*} This work was supported by grants from The National Natural Sciences Foundation of China (10075007), Hebei Provincial Nature Science Foundation (102001) and Doctoral Fund of Hebei Province (00547001D).

^{**} Corresponding author. Tel: 86-22-26564802 and 86-22-26545433, E-mail: wuweixia@eyou.com

Received: October 29, 2002 Accepted: January 10, 2003