

关于膜电位的新认识

张泽春

聊城市第二人民医院 山东临清

【摘要】膜电位在现代生物科学特别是神经生物学领域具有相当重要的地位，通过对膜电位测定实验的分析发现，其方法学本质上并不是生理学实验而是电化学实验，由此得出的结论具有一定的狭隘性。经过理论推导，我们对膜电位有了新的认识： K^+ 、 Na^+ 、 H^+ 的弥散电位代数和才是即时静息膜电位。细胞应激时可以发生动作电位，届时的离子通道就是届时的细胞膜通透性，而离子通道的门控就是细胞膜允许通透时的即时电化学驱动力。所谓离子泵是能量代谢中的某种化合物的中间状态，ATP 是关键，不能用一个泵字来解释与 ATP 有关的一切现象。

【关键词】静息电位；离子通道；门控；离子泵；膜电位

【收稿日期】2026 年 6 月 17 日 **【出刊日期】**2026 年 7 月 13 日 **【DOI】**10.12208/j.sdr.20260056

New insights into membrane potential

Zechun Zhang

The Second People's Hospital of Liaocheng, Linqing, Shandong

【Abstract】 Membrane potential plays an important role in modern biological science, especially in the field of neurobiology. Through the analysis of the measurements of membrane potential, it is found that its methodology is not a physiological experiment but an electrochemical experiment in essence, and the conclusions drawn therefrom are somewhat narrow. Through theoretical deduction and analysis, we have a new understanding of membrane potential: the algebraic sum of diffusion potential of K^+ , Na^+ , H^+ is the real-time resting membrane potential; action potential can occur when cells are stressed, and at that time, the ion channel is the permeability of cell membrane, the energy metabolism is the gated ion channel, and the gating of ion channels is the driving force when cell membranes allow permeability. Meanwhile, ATP is the key, the ion pumps are intermediate states of certain compounds involved in energy metabolism, which can not explain all phenomena related to ATP.

【Keywords】 Resting potential; Ion channel; Gating; Ion pump; Membrane potential

传统理论认为静息电位是由质膜上相对稳定的离子跨膜运输或离子流形成的。翟中和等人指出，“静息电位主要是由质膜上相对稳定的离子跨膜运输或离子流形成的……由于在静息状态下，质膜对 K^+ 的通透性大于 Na^+ ，所以 K^+ 的外流是静息电位形成的主要离子基础”^[2]。Gerald Karp 在其编著的细胞生物学教材中指出，细胞静息膜电位的形成依赖于两个基本条件，即各种离子在细胞膜两侧的不均匀分布，以及细胞膜对不同离子的选择性通透^[1]。主要原因是质膜对钾离子的通透性大于钠离子，氯离子甚至细胞中的蛋白质分子也起到了一定作用。钠离子与钾离子电压门通道由特殊的带电荷的蛋白结

构域，对膜电位的变化极端敏感，控制通道蛋白转换它的关—开构象，即两者通道打开的概率由膜电位控制。膜电位的理论研究是临床电生理检测技术（如脑电图、神经传导速度测定等）的重要基础，相关技术的应用进展也进一步丰富了对膜电位生理意义的理解^[8]。另外，经典理论认为钠钾泵存在于一切动物细胞的细胞膜上，对保持渗透平衡起着关键作用。本文通过理论推导及计算分析，得到了一些不同于传统理论的新观点，简述如下：

1 钾离子的膜内外差不是静息电位的成因

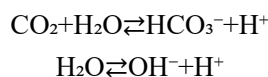
活细胞普遍存在的膜电位是一种能量代谢的现象，其能量总来源是生物氧化。生物氧化产生的氧

化能必须经过 ATP 系统的转换才能变成生物能。ATP/ADP 比例增加, ATP 分解, 合成有机物。ATP/ADP 比例降低, 刺激产能机制, 或者生物氧化产能加强, 或者有机物分解产能。

氧化能转换为生物能的过程中, 或者 ATP 与 ADP 转换中, 有能量消耗。朱大年、王庭槐在《生理学》中明确指出: “生物氧化过程中, 营养物质所释放的化学能, 约 50% 直接转变为热能, 其余约 50% 则转移至 ATP 的高能磷酸键中贮存”^[3]。热耗能由膜内向膜外耗散的时候, 形成了天然的内高外低的能量差, 也就是外高内低的电位差, 就是静息电位。

损伤电流的研究为上述观点提供了有力的实验证据。何瑞荣等译著的《肌肉和神经系统普通生理学》中记载了相关实验观察: “损伤电流的观察表明, 如果使肌纤维的损伤部位遭受窒息, 则氧的不足并不影响损伤电流的大小。相反地, 未受损伤部分的缺氧却对损伤电流的大小有显著影响……损伤部位形成的碳酸较正常部位多 5 倍半”^[4]。这一实验结果充分证明了膜电位的产生与细胞的生物氧化有直接关系。

生物氧化的最终产物是 $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$, 其水解、电离:



查表可得, 膜内 pH 6.8 时的 H^+ 浓度 $=1/10^{6.8}=1.58 \times 10^{-7}$, 膜外 pH 7.4 时的 H^+ 浓度 $=1/10^{7.4}=3.98 \times 10^{-8}$ 。

静息状态下, H^+ 的弥散电位 $=60 \times \lg(\text{膜内 } \text{H}^+ \text{ 浓度} / \text{膜外 } \text{H}^+ \text{ 浓度}) = -35.52 \text{ mV}$

H^+ 的弥散电位并没有代表静息状态下的全部膜电位, 因为尚有其他离子参与电导, 改变了电位的离子构成。人体外置换反应的发生, 多半需要有气体溢出或固体析出, 很难见到钾钠之间的置换反应。但生物体中的反应都是在液体中进行, 都是一系列的转换过程, 钾钠之间活性差别表现出来。 H^+ 的弥散电位产生之后, K^+ 、 Na^+ 可以优先于 H^+ 参与电导, K^+ 可以优先于 Na^+ 参与电导, 也就是说, K^+ 、 Na^+ 可以置换 H^+ , K^+ 还可以置换 Na^+ 。置换反应使离子电导构成复杂化。 K^+ 、 Na^+ 、 H^+ 等是等电离子, 离子种类差别不影响电位的方向与大小。生物氧化的产物 H^+ 通透细胞膜时, H^+ 的化学驱动力产生 H^+ 的弥散电位, 是主动的, 同时有热能的扩散。传导 H^+ 的弥散

电位造成的 K^+ 、 Na^+ 的弥散电位, 却是被动的, 只传递能量却并不产生能量。 K^+ 、 Na^+ 、 H^+ 都参与了电位的构成, 单一的 K^+ 的弥散电位不是静息电位的成因。

依据 Hodgkin 等 1939 年有名的实验数据^[5], 氧化过程产生的 H^+ 的弥散电位 (主动) 和由置换反应 K^+ 、 Na^+ 造成的弥散电位 (被动) 共同组成的即时电位, 才是真正的静息电位。这个数值与 Hodgkin 等的实测数值基本相同。

如果采用上述资料, Na^+ 的弥散电位是 $+55 \text{ mV}$, K^+ 的弥散电位是 -75 mV , H^+ 的弥散电位是 -35.5 mV , 可以得出:

$$\text{静息电位} = -35.5 \text{ mV} + 55 \text{ mV} - 75 \text{ mV} = -55.5 \text{ mV}$$

王庭槐主编的《生理学》指出: “大多数细胞的静息电位在 $-50 \sim -100 \text{ mV}$ 之间”^[5]。本文计算所得的 -55.5 mV 恰在此范围之内, 从侧面印证了这一计算结果的合理性。值得指出的是, 跨膜电位研究并不局限于生物细胞膜, 在人工合成膜体系 (如纳滤膜) 中同样存在类似现象, 其静电位阻模型为解析离子跨膜迁移的驱动力提供了物理化学层面的参照^[7]。

H^+ 的外流是 H^+ 的浓度驱动力主动引起的, 产生的弥散电位阻止 H^+ 的无限制外流。 K^+ 、 Na^+ 产生的弥散电位是离子电导引起的, 是被动的, 没有能量的新生和改变, 活性差别导致的 H^+ 和 Na^+ 外流, 也没有改变膜电位的方向和大小, 可见 K^+ 、 Na^+ 任何一方的弥散电位都不是静息电位, 但参与了静息电位的构成。因为 K^+ 、 Na^+ 的进出细胞膜都没有主动的能量代谢过程, 离子差别是离子活性不同造成的。

很显然, 静息电位的成因是生物氧化, 而不是 K^+ (或者 Na^+) 的弥散造成的, 膜内外 K^+ 、 Na^+ 的离子差别和静息电位一样, 都是能量代谢的结果。

我们认为 K^+ 、 Na^+ 、 H^+ 的弥散电位代数和才是即时静息膜电位。

2 离子通道是细胞膜的届时通透性

细胞膜的通透性取决于细胞膜镶嵌的蛋白质, 在高于等电点的 pH 环境中荷负电, 在低于等电点的 pH 环境中荷正电, 在某些其他的 pH 环境中, 蛋白质的荷电情况改变, 高价正离子或者负离子也可以参与电导。

静息状态下, pH 相对恒定, 细胞膜的通透性也相对恒定。因为大部分的氨基酸等电点都低于 5, 所以通常带负电, 不大允许负离子靠近并通过, 膜内外的电导主要靠正离子完成。特别是一价正离子,

K^+ 、 Na^+ 的进出就特别频繁,细胞膜对 K^+ 、 Na^+ 的通透性不会有多大的差异。 K^+ 、 Na^+ 都是都很活泼的一价正离子,它们的进出主要取决于各自的电化学驱动力与离子活性的大小,而不是细胞膜的通透性厚此薄彼,或者有什么 K^+ 通道、 Na^+ 通道、漏通道。

静息状态下生物氧化也不会停止, H^+ 外流的化学驱动力是生物氧化产生的。 H^+ 的弥散电位产生的电学驱动力导致 K^+ 、 Na^+ 的离子电导, H^+ 的弥散电位与离子活性之差(钾钠置换力)决定了离子的流向。

K^+ 的内流力= H^+ 的弥散电位力+钾钠置换力

Na^+ 的内流力= H^+ 的弥散电位力-钾钠置换力

所以 K^+ 的内流力 $>Na^+$ 的内流力, K^+ 的内流较 Na^+ 的内流机会多、数量大,静息状态下,吸钾。

K^+ 的外流力=-钾钠置换力- H^+ 的弥散电位力

Na^+ 的外流力=钾钠置换力- H^+ 的弥散电位力

所以 Na^+ 的外流力 $>K^+$ 的外流力, Na^+ 的外流较 K^+ 的外流机会多、数量大,静息状态下,排钠。

K^+ 的内流力=钾钠置换力+ H^+ 的弥散电位力

Na^+ 的外流力=钾钠置换力- H^+ 的弥散电位力

K^+ 的内流力 $>Na^+$ 的外流力, K^+ 的膜内外比例永远高于 Na^+ 的膜外内比例。

显然,静息状态下, pH 环境相对恒定,细胞膜荷电相对恒定,对 K^+ 、 Na^+ 、 H^+ 的通透不会有什么不同,更不会存在什么非门控通道或者漏通道,而且不断开关。 K^+ 、 Na^+ 、 H^+ 都是一价正离子,都是传导一个正电荷。置换反应导致的离子种类差别, K^+ 的内流量大于 Na^+ 内流量,与膜电位方向和大小无关。生物氧化加强,外正内负的电位加大,膜内外 K^+ 和膜外内 Na^+ 的浓度比加大是可能的,但不能说 K^+ 是静息电位的成因,或者存在不同的离子通道。

所谓离子通道就是离子届时的细胞膜通透性。

3 通道的门控是届时的电化学驱动力

带电离子通透细胞膜是很简单自然的事情,有能量变化就有相应的物质变化。世界上一切自然现象无非是物质和能质在时间和空间的位移。

细胞受到刺激时会以自身的能量应激,活性很强的 ATP 同步性分解,吸取膜外正离子内流,等同传递能量外流,发生动作电位。动作电位改变细胞膜内外溶液的酸度 pH ,细胞膜的通透性会发生改变。由静息状态的荷载负电到转变为荷载正电的各种改变,相应地从允许正离子通过到允许负离子通过,某些时刻甚至允许高价正、负离子通过。电化学的

迅速变化和细胞膜的荷电变化使得体液中的各种离子都有可能参与电导,进出细胞膜,有的有利于机体,有的有害于机体。 Ca^{2+} 可以保证心肌细胞有节律地收缩,金、银、汞则对人有毒。重金属离子(如汞)如何跨越细胞膜进入细胞内部,已有研究从微生物跨膜运输的角度进行了机理探讨,为理解不同离子种类与膜通透性的关系提供了参考^[6]。

刺激造成 ATP 同步性分解,同步性吸收膜外正离子内流,形成动作电位的升支。膜外 K^+ 难以逆浓度差内流,似乎门控钾离子通道是关闭的。此时活性也很强、顺浓度差的 Na^+ 大量内流,似乎是门控 Na^+ 离子通道开放,主要吸钠。不断内流的 Na^+ 内流产生的 Na^+ 弥散电位增大,很快阻止了 Na^+ 继续内流。

ATP 同步性分解导致细胞能量不足,刺激细胞的产能机制,不受氧供限制的酵解产能导致 ATP 同步性合成,同步性排斥正离子外流,膜内浓度大的 K^+ 外流,似乎激活了门控 K^+ 离子通道,主要排钾,形成动作电位降支早期的陡峭部分。

继无氧酵解造成的 ATP 同步性合成之后,氧化过程的加强逐渐占据上风,吸钾排钠,与酵解的排钾共同构成动作电位的降支平缓部分。在动作电位的复极过程中,似乎钾钠离子通道先后各有开关。

所谓离子通道的门控,就是细胞膜允许离子通透的届时电化学驱动力。

4 离子泵是届时驱动力下的物质状态

静息状态时,生物氧化导致的是异步性合成 ATP ,吸 K^+ 排 Na^+ ,是钾离子对钠离子的置换反应,是离子活性不同造成的,不存在什么离子泵。

细胞应激时, ATP 同步性分解,吸取膜外正离子,主要是 Na^+ 。细胞复极时,酵解产能同步性合成 ATP , K^+ 外流。氧化产能异步性合成 ATP ,吸 K^+ 排 Na^+ ,共同构成动作电位的降支和后电位,也不存在离子泵。

当然也可以理解为,离子泵是有关能量代谢中的某种化合物的中间状态,或者是 ATP 代谢中与其偶联的部分化合物状态,但无疑 ATP 才是关键。 ATP 分解造成逆浓度差变化的物质状态都可以理解为离子泵。

参考文献

- [1] Gerald Karp. Cell and Molecular Biology: Concepts and Experiments[M]. 6th ed. New York: Wiley, 2009.

- [2] 翟中和, 王喜忠, 丁明孝. 细胞生物学[M]. 4 版. 北京: 高等教育出版社, 2011.
- [3] 朱大年, 王庭槐. 生理学[M]. 8 版. 北京: 人民卫生出版社, 2013: 220.
- [4] 何瑞荣, 等译. 肌肉和神经系统普通生理学[M]. 北京: 人民卫生出版社, 1963: 93-95.
- [5] 王庭槐. 生理学[M]. 3 版. 北京: 人民卫生出版社, 2015: 52.
- [6] 王谦谦. 关于汞在微生物中跨膜运输的机理研究 [J]. 科技创新导报, 2017, 14 (28): 105+107.
- [7] 方彦彦, 涂丛慧, 王晓琳. 静电位阻模型在纳滤膜跨膜电位解析中的应用 [J]. 高等学校化学学报, 2010, 31 (4): 782-789.
- [8] 陈兴时, 张明岛. 现代电生理学技术的临床应用 [J]. 现代电生理学杂志, 1999, (2): 77-82.

版权声明: ©2026 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS