

文章编号 1004-924X(2007)03-0337-07

弱激光对神经元瞬时外向钾通道电流特性的影响

乔晓艳^{1,3}, 李刚¹, 贺秉军², 林凌¹

(1. 天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072;

2. 南开大学生命科学学院, 天津 300071; 3. 山西大学物理电子工程学院, 山西太原 030006)

摘要:应用全细胞膜片钳技术,研究了急性分离的大鼠海马CA3区锥体神经细胞在波长670 nm、功率5 mW的半导体激光器照射时,其瞬时外向钾通道电流特性。实验发现:弱激光对瞬时外向钾电流 I_A 有抑制作用,5 min激光抑制作用达到稳定,去极化至+50 mV时抑制百分比为 $(40.13 \pm 5.19)\%$ ($n=10$);弱激光对 I_A 的抑制作用呈现电压依赖性和可逆性,对照组、照射组和恢复组的最大激活电流密度分别为 (398.55 ± 36.49) pA/pF、 (238.62 ± 30.78) pA/pF ($n=10$, $P < 0.01$)和 (354.08 ± 35.16) pA/pF ($n=10$, $P > 0.05$);激光作用可显著地影响瞬时外向钾通道电流的稳态激活和失活过程,对照组和激光照射组通道的半数激活电压分别为 (-27.05 ± 4.53) mV和 (-2.10 ± 3.14) mV ($n=10$, $P < 0.01$),斜率因子分别为 (-26.71 ± 6.15) mV和 (-20.70 ± 4.38) mV ($n=10$, $P < 0.05$),半数失活电压分别为 (-70.49 ± 7.21) mV和 (-81.27 ± 6.26) mV ($n=10$, $P < 0.01$),斜率因子分别为 (9.47 ± 3.54) mV和 (9.58 ± 3.02) mV ($n=10$, $P > 0.05$)。结果表明:弱激光作用海马神经元可以改变其瞬时外向钾通道特性,从而影响动作电位的形成和发放,调节神经元的生理功能,有利于受损神经元的恢复和再生。

关键词:瞬时外向钾电流;膜片钳技术;弱激光照射;生物刺激效应;神经元

中图分类号:Q682 文献标识码:A

Effects of low power laser irradiation on characteristics of transient outward potassium current of neurons

QIAO Xiao-yan^{1,3}, LI Gang¹, HE Bing-jun², LIN Ling¹

(1. College of Precision Instruments & Opto-electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. College of Life Science and Technology, Nankai University, Tianjin 300071, China;

3. College of Physics & Electronics Engineering, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

Abstract: Based on the acutely isolated rat hippocampal CA3 pyramidal neurons irradiated by a semiconductor laser with wavelength 670 nm and power 5 mW, the current characteristics of transient outward potassium channel were investigated using the whole-cell patch clamp technique. The experiments reveal that low power laser decreases the amplitudes of transient outward potassium current (I_A) in a voltage-dependent and reversible manner. The percentage of current inhibition is up to $(40.13 \pm 5.19)\%$ ($n=10$) depolarizing to +50 mV in laser irradiating 5 min. The maximal activation current densities of control group, irradiation group and recovery group are (398.55 ± 36.49) pA/pF,

收稿日期:2007-01-16;修订日期:2007-02-19.

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 60174032)

(238.62 ± 30.78) pA/pF ($n=10$, $P < 0.01$) and (354.08 ± 35.16) pA/pF ($n=10$, $P > 0.05$), respectively. Laser irradiation markedly affect the activation and inactivation process of I_A . The half-activation voltage and the slope factor of the steady activation curve change under the laser's exposure. The former alters from (-27.05 ± 4.53) mV to (-2.10 ± 3.14) mV ($n=10$, $P < 0.01$) and the latter from (-26.71 ± 6.15) mV to (-20.70 ± 4.38) mV ($n=10$, $P < 0.05$). The half-inactivation voltage also changes from (-70.49 ± 7.21) mV to (-81.27 ± 6.26) mV ($n=10$, $P < 0.01$) and the slope factor of the inactivation curves from 9.47 ± 3.54 mV to 9.58 ± 3.02 mV ($n=10$, $P > 0.05$). The results indicate that the effect of low power laser on hippocampal neurons could change the current characteristics of transient outward potassium channel of membrane of neurons, and then affect the formation and firing of action potentials. Moreover, physiological function of neurons is adjusted as a result of low power laser irradiation, which might contribute to the restoration and regeneration of injured neurons.

Key words: transient outward potassium current; patch clamp technique; low power laser irradiation; biologic effect; neurons

1 引言

随着激光技术的发展,激光在生物医学领域的应用范围不断扩大^[1]。其中,弱激光生物刺激效应的临床应用越来越广泛。所谓弱激光生物刺激效应是指低强度激光作用于生物体后,不引起生物组织的不可逆损伤,而是产生某种与超声波、针灸等物理因子所获得的生物刺激相类似的效应,引起一系列的生理生化改变,从而调节机体的功能^[2]。基础研究和大量临床应用表明,弱激光对生物组织有多方面的刺激作用,能促进免疫反应,增强巨噬细胞吞噬功能,改善全身状况^[1-3];能对神经电生理活动和神经损伤后恢复和再生过程发生影响^[4-6]。使用氩氦激光穴位照射可促进脑神经元恢复,推测氩氦激光通过其生物刺激作用于穴位,使穴位组织兴奋,促进脑电活动和神经递质的分泌,调节神经系统的兴奋和抑制过程,激活处于抑制状态的脑细胞,加速受损脑组织的康复^[7]。动物实验证实,弱激光照射能促进坐骨神经再生,刺激中枢和外周神经系统,引起神经传导波形的改变^[8,9]。实验还表明弱激光可促进各种酶活性增强,改善系统血流变状态,进而激发总的代谢方面的变化^[10-12]。目前临床应用的弱激光治疗仪主要有氩氦激光器和半导体激光器,波长范围多在可见和近红外区范围内,输出功率在几~几十毫瓦^[13]。虽然弱激光的临床应用已经很多,但弱激光生物刺激作用机制尚不清楚^[14]。一些

实验无法重复,甚至出现矛盾,这给进一步的临床应用和防护带来困难。另一方面,深入到细胞分子水平的研究还很少,目前尚未有从细胞膜离子通道特性方面研究弱激光生物刺激效应的研究报道,这也是制约其前进的一个因素。此外,现已发现许多脑部疾病(癫痫、老年痴呆症等)与膜离子通道特性改变有关,研究弱激光对中枢神经细胞膜离子通道的影响,有可能为激光探针直接作用脑组织治疗某些脑部疾患起指导作用。鉴于电压门控钾离子通道在调节神经细胞膜兴奋性及神经可塑性中起着关键作用,本文利用膜片钳实验技术,研究弱激光对大鼠海马神经细胞膜瞬时外向钾通道特性的影响,为从细胞分子水平探索弱激光的生物刺激效应开辟一条新的道路。

2 材料与方 法

2.1 材料

动物: Wistar 大鼠,鼠龄 10~14 d,雌雄不限,天津药物研究院实验动物中心提供。

试剂:链霉蛋白酶(Pronase),Merck 公司产品。河豚毒素(TTX)、氯化镉(CdCl_2)、氯化四乙胺(TEA-Cl)、4-氨基吡啶(4-AP)、N-2-羟乙基哌嗪-N-2-乙磺酸(HEPES)、己二醇-一双(2-氨基乙基)四乙酸(EGTA)、 Na_2ATP 均为 Sigma 公司产品,其余为国产分析纯。

(1) 孵育液(ACSF, mmol/L): NaCl 134, KCl 5, NaH_2PO_4 1.5, MgSO_4 2, CaCl_2 2, NaH

CO₃ 25, Glucose 10, HEPES 10, pH 7.4;

(2) K 通道标准细胞外液 (mmol/L): NaCl 130, KCl 5.4, CaCl₂ 2, MgCl₂ 1, Glucose 10, HEPES 10, pH 7.3, 使用前经 0.22 μm 滤膜过滤并通氧气饱和;

(3) K 通道电极内液 (mmol/L): KCl 120, CaCl₂ 1, HEPES 10, EGTA 10, Na₂ATP 3, MgCl₂ 2, pH 7.2, 经 0.22 μm 滤膜过滤。

2.2 大鼠海马 CA3 区锥体神经元急性分离

大鼠断头取脑, 置于 0~4 °C 孵育液中迅速取出海马, 分离出 CA3 区, 手工切成 400~500 μm 厚的脑片, 移入连续通 95% O₂ + 5% CO₂ 混合气的孵育液中, 孵育 50 min。之后加入 Pronase 酶, 其终浓度为 0.5 g/L, 32 °C 下消化 20 min。消化结束用孵育液清洗脑片 3 次, 加入盛有标准细胞外液的离心管中, 使用不同口径的 Pasteur 吸管轻轻吹打, 制成细胞悬液, 静置 5 min 后取上部细胞悬液, 放入带有洁净盖玻片的培养皿内, 约 15~20 min 后细胞贴壁。分离完整的海马神经细胞显微镜下观察, 形态呈锥体或椭圆形, 顶树突和轴突完整, 细胞表面光滑, 颗粒均匀细腻, 它可在 4~6 h 内保持良好的生理状态^[15]。

2.3 全细胞膜片钳记录和数据分析

在 22~25 °C 室温下, 利用 EPC-10 膜片钳放大器 (HEKA 公司, 德国) 进行全细胞膜片钳记录。实验参数的设置、数据采集和刺激方式的施加均通过 Pulse 软件控制, 采样频率为 20 kHz。记录用玻璃微电极 (中科院电子所) 经 PP-830 微电极拉制仪 (Narishage, Japan) 两步拉制而成, 充灌电极内液后, 电极阻抗为 2~4 MΩ。当电极与细胞膜之间形成高阻封接 (>1 GΩ) 后, 立即进行快电容补偿, 然后稍加负压破膜, 使电极液与细胞内液相通, 再进行慢电容和串联电阻补偿, 串联电阻补偿为 80%。

实验所用连续半导体激光器分别是波长 670 nm, 输出功率 5 mW, 光斑直径 3 mm, 功率密度为 70.8 mW/cm² 以及波长 670 nm, 输出功率 20 mW, 光斑直径 4 mm, 功率密度 159.2 mW/cm²。激光照射距离 15 cm, 照射角度 75°, 光束从侧面入射, 照射装置自行改制而成, 照射示意图如图 1 所示。实验过程能够在倒置显微镜下观察到激光器发射出的红光照射于目标细胞上。

实验结果分析采用 Igor4.04 软件和 Ori-

gin6.0 统计软件完成, 数据经 P/N 漏减处理后进行统计分析, 分析结果用 Mean ± S. D. 表示, 激光照射前后差异的显著性用单因方差分析和 *t* 检验进行分析, *P* < 0.05 表示有统计学差异。

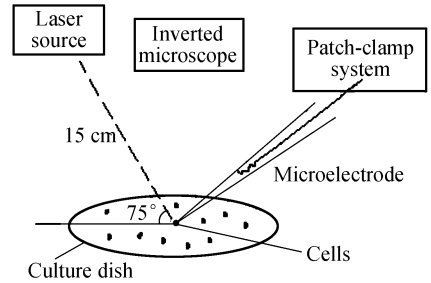


图1 激光照射示意图

Fig. 1 Schematic diagram of laser irradiation

3 结果

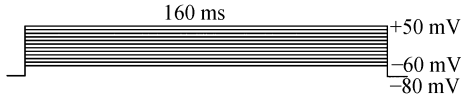
3.1 瞬时外向钾通道电流 (I_A) 的记录

采用上述标准细胞外液和电极内液, 且在外液中加入 1 μmol/L TTX 和 0.1 mmol/L 的 CdCl₂, 记录海马 CA3 区锥体神经细胞膜上外向钾电流。置钳制电位于 -80 mV, 给予脉冲幅度为 -60 ~ +50 mV, 脉冲宽度 160 ms, 步幅 +10 mV 的去极化脉冲刺激电压图 2(a), 刺激频率 0.5 Hz, 激活并记录得到一组外向电流图 2(b)。该外向电流包括两种成分, 即快速激活和失活的瞬时外向钾电流 I_A (峰值部分) 和缓慢激活且几乎不失活的延迟整流钾电流 I_K (平台部分)。向外液中加入 20 mmol/L TEA - Cl 后, 基本阻断 I_K , 得到瞬时外向钾电流 I_A 图 2(c), 用 2 mmol/L 4-AP 可绝大部分阻断之图 2(d), 证实所记录到的外向电流为瞬时外向钾电流。由于 I_A 具有激活和失活迅速的特点, 故实验中记录电流 I_A 的刺激脉冲宽度可选择 60 ms 的刺激时程^[16]。

3.2 弱激光对 I_A 的作用与刺激频率的关系

置保持电位 -80 mV, 给予 +50 mV 的去极化脉冲电压刺激, 刺激时程 160 ms, 刺激次数 15 次, 刺激频率分别设为 0.25 Hz、1 Hz 和 4 Hz, 记录电流 I_A 作为对照。然后使用波长 670 nm, 输出功率 5 mW, 功率密度 70.8 mW/cm² 的激光照射细胞 5 min, 给予同样方式的去极化刺激, 再次测量上述外向电流, 以峰电流作为 I_A , 考察弱激

光对 I_A 的作用与刺激频率和刺激次数的关系。结果表明:各个频率下记录到的 I_A 同对照组相比均有明显减小,然而照射组在分别给予三种不同频率的去极化脉冲刺激时,15 次刺激过程中记录到的 I_A 均未发生变化,并且同一刺激频率下,第 15 次刺激与第一次刺激记录到的 I_A 没有显著差异,如图 3 所示,未出现电流随刺激频率和刺激次数增大而增大的现象,说明弱激光对 I_A 的抑制作用与刺激频率和刺激次数无关。



(A) 刺激脉冲

(A) Stimulation pulses

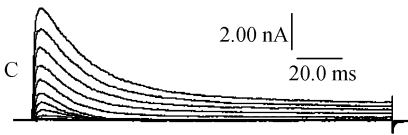
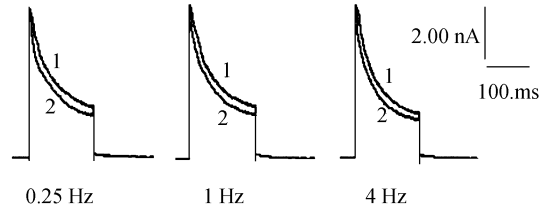
(B) 记录的 I_A 和 I_K 电流(B) Current traces of I_A and I_K (C) 用 20 mmol/L TEA-Cl 阻断 I_K 后的 I_A 电流(C) I_A recorded in the presence of 20 mmol/L TEA-Cl(D) 2 mmol/L 4-AP 可基本阻断 I_A (D) I_A blocked in the presence of 2 mmol/L 4-AP

图 2 记录的外向钾电流

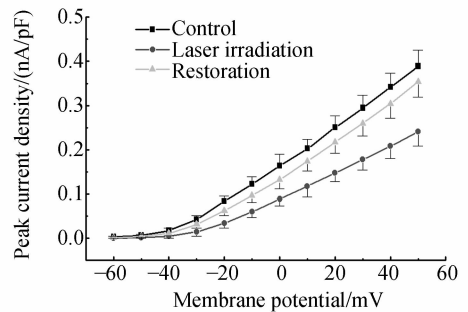
Fig. 2 Recorded outward potassium current

3.3 弱激光照射对瞬时外向钾电流曲线的影响

给予同 3.1 中相同的刺激方式,激活并记录 I_A 作为对照组。然后打开激光器,以文中 1.3 所述方式,使用波长 670 nm,输出功率 5 mW,功率密度 70.8 mW/cm^2 的激光照射海马锥体神经细胞,在照射不同时间,以相同的去极化刺激激活并记录 I_A 作为激光照射组。最后关闭激光器停止照射,细胞恢复 3 min,再次以同样方式激活并记

图 3 不同刺激频率下激光照射对 I_A 的影响Fig. 3 Effect of laser irradiation on I_A at different stimulative frequencies

录 I_A 作为恢复组,记录得到的 I_A 。以不同膜电位(去极化刺激电位)为横轴,该膜电位下激活的 I_A 电流密度值(电流/膜电容)为纵轴,绘制通道电流的曲线(图 4)。由曲线可知,激光照射可以明显抑制 I_A ,抑制作用在照射 5 min 时达到稳定,去极化至 +50 mV 时抑制百分比为 $(40.13 \pm 5.19)\%$ ($n=10$),且抑制作用随着膜电位的增加而增大,即呈现出电压依赖特性。对照组、照射组和恢复组最大激活电流密度分别为 $(398.55 \pm 36.49) \text{ pA/pF}$ 、 $(238.62 \pm 30.78) \text{ pA/pF}$ ($n=10$, $P < 0.01$) 和 $(354.08 \pm 35.16) \text{ pA/pF}$ ($n=10$, $P > 0.05$)。经 t 检验,对照组和激光照射组 I_A 在统计学上有显著性差异 ($n=10$, $P < 0.01$),对照组与恢复组 I_A 无统计学差异 ($n=10$, $P > 0.05$)。由此可知,激光作用可电压依赖性地抑制瞬时外向钾通道电流,而且这种抑制作用具有可逆性。

图 4 对照组、激光照射组和恢复组 I_A 的 $I-V$ 曲线Fig. 4 $I-V$ curves of I_A from control, irradiation and restoration groups

3.4 弱激光对 I_A 作用的剂量效应关系

置钳制电位 -80 mV , 给予 $+50 \text{ mV}$ 的去极化脉冲刺激,刺激时程 160 ms,刺激频率 0.5 Hz,记录得到外向钾电流 (I_A 取外向电流的峰值)作为对照。然后采用波长 670 nm,输出功率

20 mW,功率密度 159.2 mW/cm^2 的激光照射目标细胞,以同样脉冲刺激方式激活并记录电流 I_A 。图5显示了对照和激光照射5 min、20 min时记录的 I_A 电流曲线。780 nm,20 mW 激光照射海马神经元,作用达到稳定后, I_A 首先从对照组的 $(6.11 \pm 0.58) \text{ mV}$ 降至照射组的 $(3.62 \pm 0.45) \text{ mV}$ ($n=10, P<0.01$)。然后当激光照射20 min,激光能量密度 $>40 \text{ J/cm}^2$ 时,记录的电流 I_A 又显著增大。图6为相同波长、不同物理剂量(能量密度)的激光作用对瞬时外向钾电流 I_A 幅度的影响。

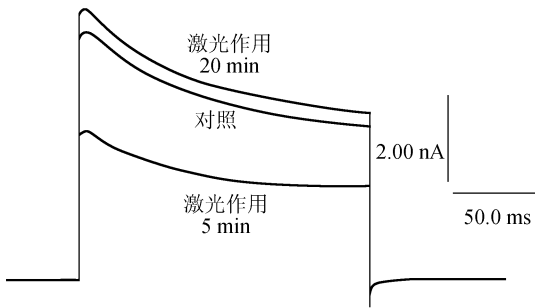


图5 不同剂量激光照射下记录的电流曲线

Fig. 5 Recorded current curves of I_A at different irradiating-doses

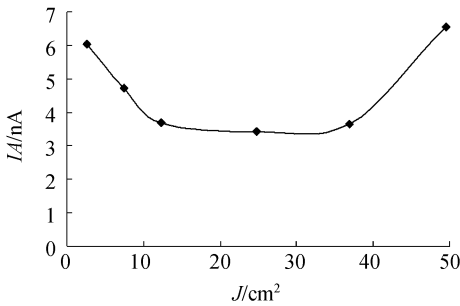


图6 不同能量密度激光作用对 I_A 电流幅度影响

Fig. 6 Effect of laser irradiation on I_A amplitudes under the different energy densities

实验结果表明,当激光能量密度在一定剂量范围内,作用是稳定的。小于 5 J/cm^2 的激光能量密度不能诱发瞬时外向钾通道特性改变,因而通道电流在照射前后基本不变;激光能量密度在 $5 \sim 10 \text{ J/cm}^2$ 时,激光作用可抑制通道激活, I_A 减小;激光能量密度在 $10 \sim 40 \text{ J/cm}^2$ 时,该抑制作用达到平衡, I_A 不再减小;而 $>40 \text{ J/cm}^2$ 的激光能量密度,又可促进通道激活, I_A 增大。因此,激光照射的能量密度是影响弱激光生物效应的一个

重要因素,同一波长的激光,当照射能量密度不同时,可以表现完全相反的效应,小剂量照射对神经元瞬时外向钾电流起抑制作用,大剂量照射则起促进作用。表现出了弱激光生物刺激效应与激光能量密度呈近似抛物线关系。

3.5 激光照射对 I_A 稳态激活特性的影响

给予同3.1中相同的刺激方式,引出一系列瞬时外向钾电流作为对照。以波长 670 nm,输出功率 5 mW,功率密度 70.8 mW/cm^2 的激光照射细胞,照射时间 5 min,再次记录上述电流,然后利用公式 $G = I/V - V_{\text{rev}}$ 将电流值转换成电导值,其中 G 为电导, V 为测试膜电位, V_{rev} 为翻转电位, I 为不同膜电位下测定的电流峰值。以电导值与最大电导值的比值 G/G_{max} 对应膜电位分别绘制激光作用前后 I_A 的稳态激活曲线,如图7所示。所得曲线可以用 Boltzmann 方程 $G/G_{\text{max}} = 1/\{1 + \exp[V - V_{1/2}]/k\}$ 进行拟合,其中 $V_{1/2}$ 为半数激活电压, k 为曲线的斜率因子。由图7可以看出对照组与激光照射组稳态激活曲线均呈 S 型,并由此计算出对照组和照射组瞬时外向钾通道的半数激活电压 $V_{1/2}$ 分别为 $(-27.05 \pm 4.53) \text{ mV}$ 和 $(-2.10 \pm 3.14) \text{ mV}$ ($n=10, P<0.01$),斜率因子分别为 $(-26.71 \pm 6.15) \text{ mV}$ 和 $(-20.70 \pm 4.38) \text{ mV}$ ($n=10, P<0.05$)。由此可知,激光作用可明显改变 I_A 的激活特性,使激活曲线向去极化方向移动,并改变其斜率因子。

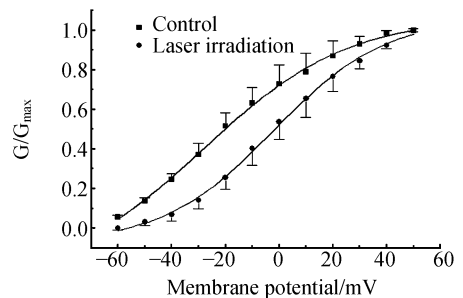


图7 对照组和照射组瞬时外向钾电流稳态激活曲线

Fig. 7 Effect of laser application on steady-state activation curve of transient outward potassium current in hippocampal neurons

3.6 激光照射对 I_A 稳态失活特性的影响

置钳制电位 -80 mV ,先给 $-120 \sim -10 \text{ mV}$,步幅 10 mV ,刺激波宽 80 ms 的阶梯钳制预脉冲刺激,然后再给予 $+50 \text{ mV}$ 的测试脉冲

刺激,刺激波宽 100 ms,刺激频率 0.5 Hz,记录得到电流作为对照。然后以波长 670 nm,功率 5 mW,功率密度 70.8 mW/cm^2 的激光照射细胞,照射时间 5 min,再次记录上述电流。以电流峰值与最大电流峰值的比值 I/I_{\max} 对应预脉冲刺激电位,分别绘制激光作用前后 I_A 的稳态失活曲线,如图 8 所示。所得曲线可以用 Boltzmann 方程 $I/I_{\max} = 1/\{1 + \exp[V - V_{1/2}]/k\}$ 拟和,其中 I 为电流峰值, V 为膜电位, $V_{1/2}$ 为半数失活电压, k 为曲线斜率因子。由图中可以看出对照组与激光照射组稳态失活曲线均呈反 S 型,并由此计算出对照组和照射组瞬时外向钾通道的半数失活电压

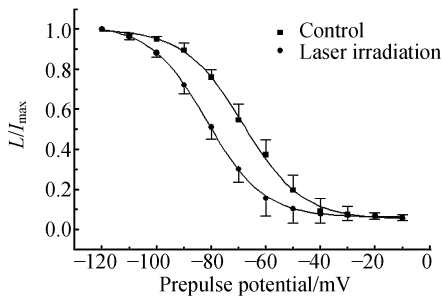


图 8 对照组和照射组瞬时外向钾电流稳态激活曲线
Fig. 8 Effect of laser application on steady-state activation curve of transient outward potassium current in hippocampal neurons

$V_{1/2}$ 分别为 $(-70.49 \pm 7.21) \text{ mV}$ 和 $(-81.27 \pm 6.26) \text{ mV}$ ($n=10, P < 0.01$),斜率因子分别为 $(9.47 \pm 3.54) \text{ mV}$ 和 $(9.58 \pm 3.02) \text{ mV}$ ($n=10, P > 0.05$)。由此可知,激光作用可明显改变 I_A 的失活特性,使失活曲线向超极化方向移动,但不改变其斜率因子。

4 结论

一定能量密度的弱激光作用大鼠海马神经元,可诱导神经元瞬时外向钾通道电流受到抑制,且这种抑制作用呈现电压依赖性、可逆性,但无刺激频率依赖性。激光能量密度是影响弱激光生物刺激效应的重要因素,呈现出剂量依赖性。弱激光作用可使 I_A 稳态激活曲线右移,斜率因子改变,半数激活电压升高;稳态失活曲线左移,斜率因子不变,半数失活电压降低。以上结果表明,弱激光作用于海马神经元,引起神经细胞膜瞬时外向钾通道的激活过程受到抑制,使得动作电位复极化早期电压依赖性钾通道开放延迟且关闭加快。由此可见,弱激光作用是通过抑制钾通道的激活并促使其失活而减小神经元瞬时外向钾电流。本实验结果提示:弱激光诱导神经元电压门控钾离子通道功能特性及通道构象改变可能是弱激光生物刺激效应的本质。

参考文献:

- [1] 马军山,候琳琳,付东翔,等. 双荧光标记生物芯片激光共聚焦检测系统[J]. 光学精密工程,2005,13(6):727-734. MA J SH, HOU L L, FU D X, *et al.*. Two-laser scanning confocal system for microarray analysis[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(6):727-734. (in Chinese)
- [2] MESTER E, MESTER A F, MESTER A. The biomedical effects of laser application [J]. *Laser. Surg. Med.*, 1985, 5(1): 31-39.
- [3] KARU T I, RYABYKH T P, FEDOSEYEVA G E, *et al.*. Helium-Neon laser induced respiratory burst of phagocytic cell [J]. *Laser. Surg. Med.*, 1989, 9(6): 585-588.
- [4] ANDERS J J, GEUNA S, ROCHKIND S. Phototherapy promotes regeneration and functional recovery of injured peripheral nerve[J]. *Neurol. Res.*, 2004, 26(2): 233-239.
- [5] WOLLMAN Y, ROCHKIND S, SIMANTOV R. Low power laser irradiation enhances migration and neurite sprouting of cultured rat embryonal brain cells [J]. *Neurol Res*, 1996, 18(5): 467-470.
- [6] de SOUZA S C, MUNIN E, ALVES L P, *et al.*. Low power laser radiation at 685 nm stimulates stem-cell proliferation rate in *Dugesia tigrina* during regeneration [J]. *J. Photochem. Photobiol. B*, 2005, 80(3): 203-207.
- [7] KARU T I, PYATIBRAT L, KALENDO G S. Irradiation with He-Ne laser increases ATP level in cells cultivated in vitro[J]. *J. Photochem. Photobiol. B*, 1995, 27(3): 219-223.
- [8] 李康英, 候占英. 低强度激光的生物效应对组织修复的影响[J]. 激光生物学报, 2005, 14(4): 283-286. Li K Y, HOU Z Y. Biological effects of low power laser on the repair of injured tissues [J]. *Acta Laser Biology*

Sinica, 2005, 14(4): 283-286. (in Chinese)

- [9] ROCHKIND S, ROUSSO M, NISSAN M, *et al.*. Systemic effects of low-power laser irradiation on the peripheral and central nervous system, cutaneous wounds and burns [J]. *Laser. Surg. Med.*, 1989, 9(2): 174-182.
- [10] 卢启鹏,侯宝忠,朱琳琳. 半导体激光血管照射治疗静脉曲张的机理研究 [J]. *光学精密工程*, 2006,14(4): 589-593.
- LU Q P, HOU B ZH, ZHU L L. Mechanism of varicosity treated by semiconductor laser intravenous irradiation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(4): 589-593. (in Chinese)
- [11] KARU T I, PIATIBRAT L V, KALEND G S. The effect of He-Ne laser radiation on the adhesive properties of the cell membrane [J]. *Biull. Eksp. Biol. Med.*, 1993, 115(6): 622-623.
- [12] 兰秀凤,刘晓然,王亚伟,等. 弱激光血管内照射改善红细胞聚集能力的物理机理研究[J]. *中国激光*,2005,27(5):477-480.
- LAN X F, LIU X R, WANG Y W, *et al.*. Physical analysis of intravascular low-reaction-level laser irradiation therapy decreasing the aggregate degree of erythrocyte [J]. *Chin. J. Laser*, 2005, 27(5): 477-480. (in Chinese)
- [13] SIPOSAN D G, LUKACS A. Relative variation to received dose of some erythrocytic and leukocytic indices of human blood as a result of low-level laser radiation; an in vitro study[J]. *J. Clin. Laser Med. Surg.*, 2001, 19(2): 89-103.
- [14] KARU T. Primary and secondary mechanisms of action of visible to near-IR radiation on cells [J]. *J Photochem Photobiol B*, 1999, 49(1): 1-17.
- [15] ZOU B D, OUYANG K F, CHEN Y Z, *et al.*. Blockade of U50488H on potassium currents in acutely isolated mice hippocampal CA3 pyramidal neurons [J]. *Brain Res.*, 2001, 897: 52-59.
- [16] CHI X X, XU Z C. Differential changes of potassium currents in CA1 pyramidal neurons after transient forebrain ischemia [J]. *J. Neurophysiol.*, 2000, 84 (6): 2834-2843.

作者简介:乔晓艳(1970—),女,天津大学精密仪器与光电子工程学院生物医学工程系博士生,副教授。主要从事激光生物医学、生物医学微弱信息检测等方向的研究工作。E-mail:xyqiao@sxu.edu.cn