

坐骨神经损伤后大鼠臀大肌、小腿三头肌固有频率测定的实验研究

史智君¹, 严隽陶¹, 杨斌堂², 杨诣坤², 孔亚敏¹, 卢新刚¹, 伍丹丹¹

1. 上海中医药大学附属岳阳中西医结合医院, 上海 200437; 2. 上海交通大学机械系统与振动国家重点实验室, 上海 200240

【摘要】目的: 确定坐骨神经损伤后大鼠臀大肌、小腿三头肌固有频率, 并观察不同状态下其固有频率是否一致, 为康复治疗频率的选择提供实验依据。**方法:** 将24只SD大鼠随机分为空白组、模型组、麻醉组。模型组行坐骨神经钳夹伤术; 麻醉组处以水合氯醛麻醉; 空白组不做任何干预。造模后第7天通过振动仪器为大鼠臀大肌、小腿三头肌施加冲击振动激励, 在振动响应检测模块测得的数据基础上, 根据实时频谱观察、时频分析方法, 确定大鼠臀大肌、小腿三头肌固有频率。**结果:** 每个受试部位有两个规律性明显的峰值: (1) 空白组、模型组、麻醉组大鼠臀大肌、小腿三头肌第一峰值频率无显著性差异 ($P>0.05$), 臀大肌、小腿三头肌在同一组别 (相同状态) 中其固有频率无明显差异 ($P>0.05$); (2) 空白组、模型组、麻醉组大鼠臀大肌、小腿三头肌第二峰值频率无显著性差异 ($P>0.05$), 臀大肌、小腿三头肌在同一组别 (相同状态) 中其固有频率无统计学差异 ($P>0.05$)。**结论:** 臀大肌、小腿三头肌的第一峰值为其固有频率 (8.25、8.12 Hz); 肌肉组织的固有频率是稳定的, 同一肌肉组织的固有频率不会因其所处状态不同而发生较大差异。

【关键词】 固有频率; 振动激励; 机械振动疗法; 神经损伤

【中图分类号】 R35; R-33

【文献标志码】 A

【文章编号】 1005-202X(2019)06-0721-06

Experimental study on the natural frequencies of gluteus maximus and triceps muscle of the calf in rats after sciatic nerve injury

SHI Zhijun¹, YAN Juntao¹, YANG Bintang², YANG Yikun², KONG Yamin¹, LU Xin'gang¹, WU Dandan¹

1. Yueyang Hospital of Integrated Traditional Chinese and Western Medicine, Shanghai University of Traditional Chinese Medicine, Shanghai 200437, China; 2. State Key Laboratory of Mechanical System and Vibration, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China

Abstract: Objective To determine the natural frequencies of gluteus maximus and triceps muscles of the calf in rats after sciatic nerve injury, and to observe whether their natural frequencies are consistent under different states, so as to provide experimental evidence for the selection of rehabilitation frequency. **Methods** A total of 24 SD rats were randomly divided into 3 groups, namely blank group, model group and anesthesia group. The rats in model group suffered from sciatic nerve injury; those in anesthesia group were anesthetized with chloral hydrate; and those in blank group didn't receive any intervention. On the 7th day after modeling, shock vibration excitation was applied to gluteus maximus and triceps muscle of the calf by vibration instrument. Based on the data measured by the vibration response detection module, the natural frequencies of gluteus maximus and triceps muscle of the calf were determined by real-time spectrum observation and time-frequency analysis method. **Results** There were two regular peaks at each test site. (1) No significant difference was found in the first peak frequencies of gluteus maximus and triceps muscle of the calf among 3 groups ($P>0.05$), and the natural frequencies between gluteus maximus and triceps muscle of the calf in the same group (the same state) ($P>0.05$). (2) There was no significant difference in the second peak frequencies of gluteus maximus and triceps muscle of the calf among 3 groups ($P>0.05$), and the natural frequencies between gluteus maximus and triceps muscle of the calf in the same group (same state) ($P>0.05$). **Conclusion** The first peaks of gluteus maximus and triceps muscle of the calf are their natural frequencies (8.25 and 8.12 Hz, respectively). The natural frequency of muscle tissue remains stable, and the state has trivial effects on the natural frequency of the same muscle tissue.

Keywords: natural frequency; vibration excitation; mechanical vibration therapy; nerve injury

【收稿日期】 2019-02-16

【基金项目】 国家自然科学基金 (30973806); 国家自然科学基金青年科学基金 (81603713); 上海中医药大学研究生“创新能力培养”专项科研项目 (Y201804)

【作者简介】 史智君, 博士研究生, 主要研究方向: 传统康复与脑功能的相关性研究, E-mail: shizhijun_happy@126.com

【通信作者】 严隽陶, 主任医师, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 传统康复与脑功能的相关性研究, E-mail: doctoryjt@sohu.com

前言

固有频率是系统固有的物理参数,其振动的频率与初始条件无关而是由物体本身的刚度、质量等固有特性决定的,一般可由冲击激励测得^[1-2]。对机体而言,通常将肌肉、骨骼等组织等效为质量、弹簧及阻尼以研究其各部分的固有频率^[3]。不同组织存在其相应的固有频率,而当接近或等同于该组织固有频率的振动激励时则会产生最大的幅值,从而引发一定的生物效应^[4]。研究表明:施加适宜的外在振动刺激使之与肌肉组织的固有频率达到和谐状态,能够提高肌肉的兴奋性,促进肌力低下患者的下肢训练效果^[2,5-6]。在外周神经损伤中,坐骨神经损伤较为常见,其所导致的肢体功能障碍是临床及康复治疗亟需解决的重点问题^[7-8]。由于外在振动激励作用于机体时,频率是影响神经肌肉系统反应幅度的最主要因素^[9]。因此,本实验主要检测损伤侧大鼠臀大肌、小腿三头肌的固有频率,并观察不同状态下的固有频率变化,为之后康复振动治疗频率的参数选择提供实验基础。

1 材料与方法

1.1 实验动物及分组

选取2月龄健康清洁级Sprague-Dawley大鼠24只,体质量(180±10)g,由上海中医药大学附属岳阳中西医结合医院实验动物中心提供并饲养。饲养条件:温度24~26℃,湿度55%~65%,12h:12h光暗周期,自由摄食和饮水。

本次实验采用随机数字法,将大鼠分为空白组、模型组、麻醉组,每组各8只。实验过程中对大鼠的处置严格遵守动物伦理准则和指南的相关规定。

1.2 主要仪器及试剂

SXP-1C手术显微镜(上海医光仪器有限公司),10%水合氯醛(上海西唐生物科技有限公司),手术直剪、弯止血钳、弯头组织镊(浦东金环),显微止血钳(上海金钟),11/0显微外科带针缝合线(宁波灵桥),新标1号-尼龙缝合线(浦东金环),半弧正角针(浦东金环),眼科手术直剪(苏州市施强医疗器械有限公司),大鼠固定器(自制),DL5A Neuromatic-2000C型神经电图仪(丹麦),固有频率检测平台(上海交通大学机械系统与振动国家重点实验室)。

1.3 模型制备

坐骨神经损伤模型:参照Gigo-Benato^[10]将SD大鼠分别以10%水合氯醛3 mL/kg腹腔注射麻醉,常规备皮,碘伏消毒后,于右下肢后外侧纵行切开皮肤,钝性分离股二头肌,于距离梨状肌下缘5 mm处,游离出约2 cm坐骨神经,用长14 cm-JZ06Cr号止血钳完全闭合钳夹坐骨神经3次,每次10 s,中间间隔10 s(钳夹力为46 N),钳夹段长度约2 mm,宽度1 mm,松开血管钳后见钳夹段神经完全透明,但神经外膜处未见出血,造成Sunderland III度损伤^[11]。术后30 min检测损伤侧坐骨神经动作电位潜伏期、波幅^[12],刺激强度约1~20 mA,一般以波形达最大振幅且不引起周围无关肌肉组织收缩为宜,刺激时间0.1~0.2 ms,刺激频率1 Hz。记录:将钩形针电极分别置于损伤点标记处和损伤点远端,两电极间距离测定采用精度为0.2 mm的游标尺直接测量约为10 mm,记录电极置于神经入肌点处,记录时以综合肌电出现的峰波前缘为准^[13]。当运动神经传导速度(Motor Conduction Velocity, MCV)降至10 m/s以下时,认为坐骨神经轴索、髓鞘及神经内膜损伤断裂^[14],确定神经损伤模型造模成功(图1),生理盐水冲洗伤口,常规分层缝合肌肉、皮肤。

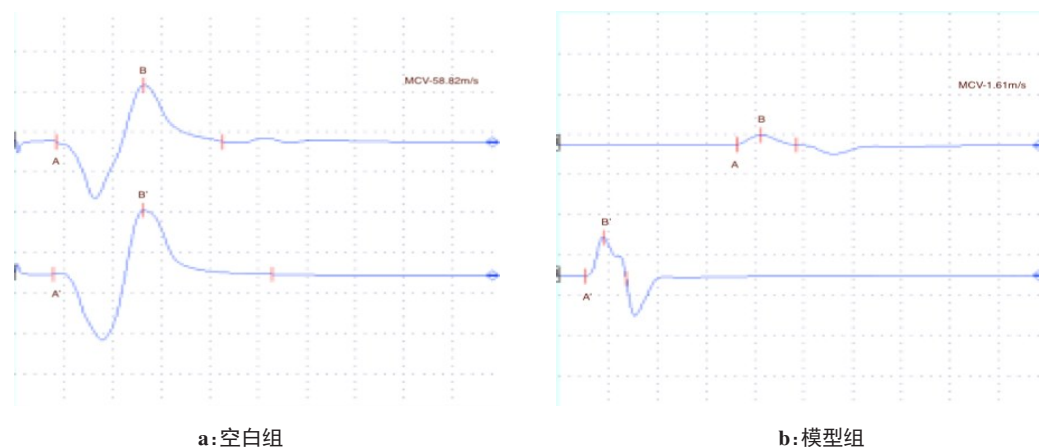


图1 坐骨神经传导速度(MCV)

Fig.1 Sciatic nerve motor conduction velocity

MCV=两刺激电极之间的距离/动作电位潜伏期的差值(m/s);A、A'为潜伏期,B、B'为波幅

麻醉模型:将大鼠以10%水合氯醛3 mL/kg腹腔注射麻醉,余不做任何处理。

1.4 检测方法

神经损伤第7天,将实验大鼠俯卧位固定于大鼠固定器并置于振动测试台,应用冲击测量仪器(锤击法)于每只大鼠腿部臀大肌、小腿三头肌肌腹中央位置施加冲击振动激励,通过振动响应检测模块测得大鼠两部位振动响应,将采集到的时域振动信号数

据通过快速傅里叶变换转至频域数据,可体现于频谱、自功率谱及时频谱中。每只大鼠臀大肌、小腿三头肌冲击测量10次,取平均值,确定固有频率。(Matlab软件的数据处理和系统分析得到响应点和激励点关系的传递函数,对传递函数进行去直流分量和加窗处理,从而去掉传递函数中由于及离谱能量太低而造成的假峰)(图2)。

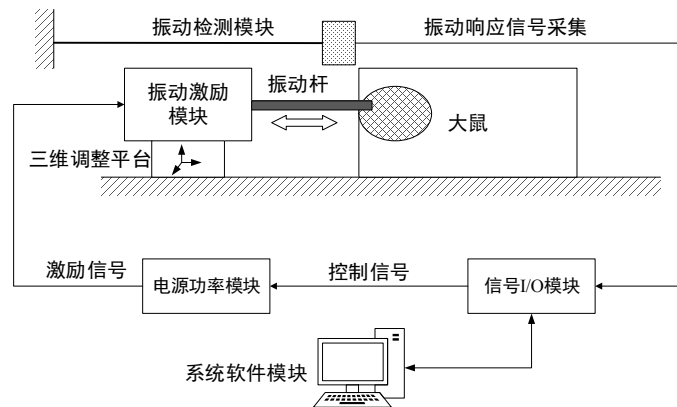


图2 系统功能框解图

Fig.2 System function block diagram

单自由度系统在脉冲激励下的动力学方程为：

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = \delta(t) \quad (1)$$

其中 $\delta(t)$ 为脉冲振动激励,其振动响应的解为:

$$x(t) = \begin{cases} \frac{1}{m\omega_d} e^{-\zeta\omega_d t} \sin(\omega_d t), & t > 0 \\ 0, & t < 0 \end{cases} \quad (2)$$

其中, $\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}$ 为有阻尼固有频率,该频率可通过快速傅里叶变换体现于频谱、自功率谱或时频谱当中。

1.5 统计学方法

采用SPSS 25.0软件包进行数据分析与处理。计量资料用均值、标准差、最小值、最大值表示,组间比较采用单因素方差分析,组内比较采用配对 t 检验, $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 大鼠臀大肌、小腿三头肌频率峰值

施加冲击振动激励于大鼠臀大肌、小腿三头肌肌腹中央各10次响应测得,通过时频分析等方法,结果发现每个部位有两个峰值可能是其固有频率值(表1和图3)。

2.2 大鼠臀大肌、小腿三头肌第一峰值固有频率差异

表1 峰值频率(Hz)

Tab.1 Peak frequency (Hz)

组别	固有频率值	均数	标准差	最小值	最大值
空白组	臀大肌1	8.448 62	0.279 36	7.910 16	8.789 06
	臀大肌2	12.744 14	0.826 53	11.328 13	14.062 50
	小腿三头肌1	8.300 78	0.346 25	7.714 84	8.789 06
	小腿三头肌2	12.920 46	1.035 62	11.132 81	14.062 50
模型组	臀大肌1	8.257 38	0.615 12	7.519 53	9.570 31
	臀大肌2	13.037 11	0.825 53	11.621 09	13.964 84
	小腿三头肌1	8.136 33	0.300 91	7.690 43	8.593 75
	小腿三头肌2	13.168 00	0.589 65	12.451 17	13.888 89
麻醉组	臀大肌1	8.695 82	0.900 27	7.324 22	10.009 77
	臀大肌2	13.790 31	1.740 72	11.827 26	16.845 70
	小腿三头肌1	8.120 58	0.538 36	7.446 29	9.155 27
	小腿三头肌2	13.101 97	1.014 26	11.596 68	15.014 65

1:第一个峰值;2:第二个峰值

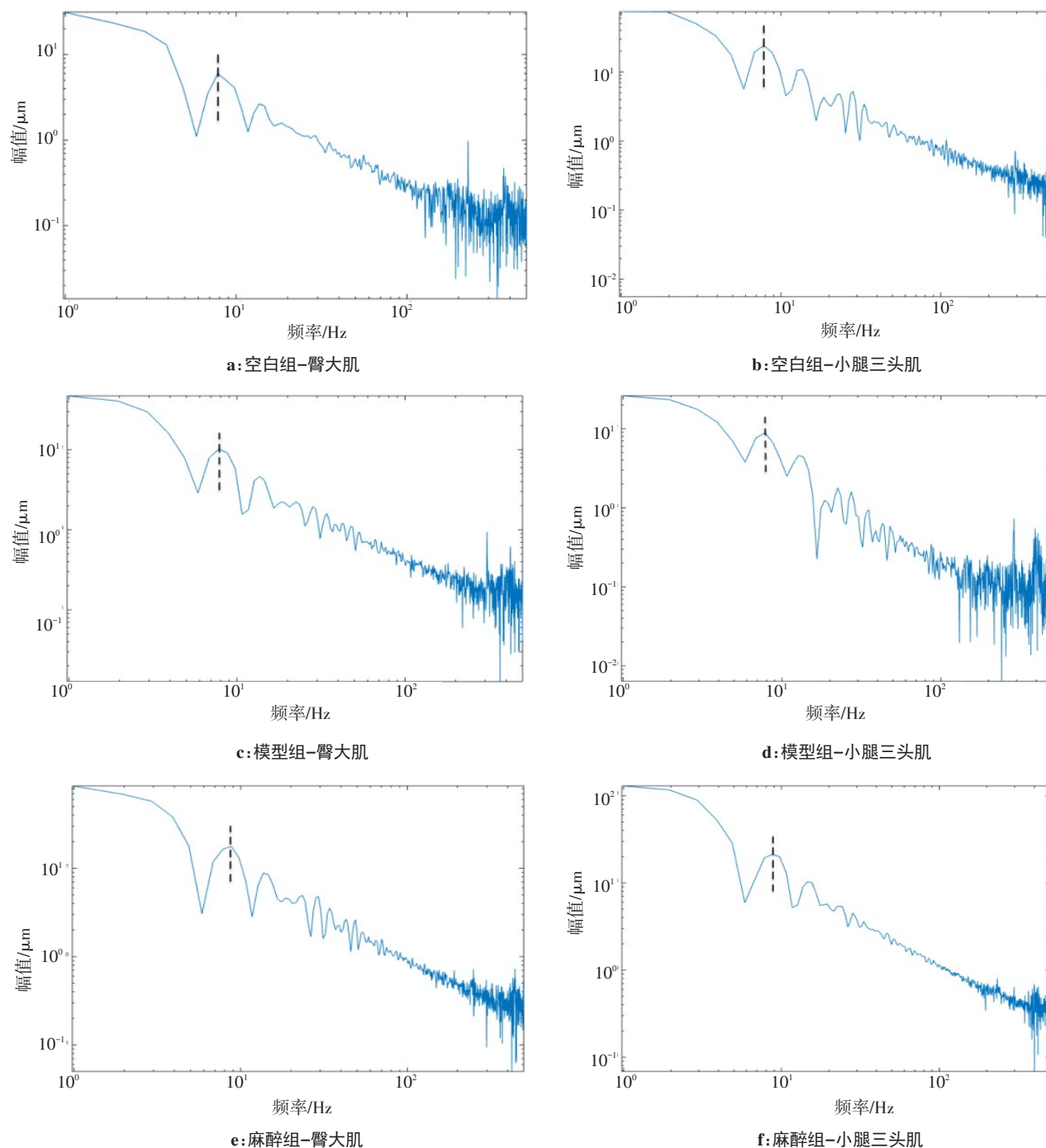


图3 臀大肌、小腿三头肌固有频率峰值图

Fig.3 Peak frequencies of gluteus maximus and triceps muscle of calf

虚线为固有频率峰值

空白组、模型组、麻醉组臀大肌第一峰值固有频率无显著性差异($P>0.05$),空白组、模型组、麻醉组小腿三头肌第一峰值固有频率无显著性差异($P>0.05$),臀大肌、小腿三头肌在相同组别中其固有频率无明显差异($P>0.05$)(表2)。

2.3 大鼠臀大肌、小腿三头肌第二峰值频率差异

空白组、模型组、麻醉组臀大肌第二峰值频率无显著性差异($P>0.05$),空白组、模型组、麻醉组小腿三

头肌第二峰值频率无显著性差异($P>0.05$),臀大肌、小腿三头肌在相同组别中其第二峰值频率无明显差异($P>0.05$)(表3)。

3 讨论

自然界以及日常生命活动中,普遍存在物体的往复运动或状态的循环变化,这类现象称为振荡,例如钟摆的摆动、心脏的跳动等都具有明显的振荡特

表2 臀大肌、小腿三头肌第一峰值固有频率(Hz)
Tab.2 The first peak frequencies of gluteus maximus and triceps muscle of the calf (Hz)

组别	n	臀大肌	小腿三头肌	t值	P值
空白组	8	8.45±0.28	8.30±0.35	1.966	0.090
模型组	8	8.25±0.62	8.12±0.30	1.850	0.107
麻醉组	8	8.70±0.90	8.12±0.54	1.507	0.176
F值	-	0.379	0.431	-	-
P值	-	0.689	0.656	-	-

1:第一个峰值

表3 臀大肌、小腿三头肌第二峰值频率(Hz)
Tab.3 The second peaks frequencies of gluteus maximus and triceps muscle of the calf (Hz)

组别	n	臀大肌	小腿三头肌	t值	P值
空白组	8	12.74±0.83	12.92±1.04	1.388	0.208
模型组	8	13.04±0.83	13.17±0.59	1.018	0.343
麻醉组	8	13.79±1.74	13.10±1.01	0.860	0.418
F值	-	1.403	0.457	-	-
P值	-	0.268	0.639	-	-

2:第二个峰值

性。振动则是振荡的一种特殊表现形式,是平衡位置附近微小或有限的振荡。振动问题主要涉及系统、激励及响应3个方面^[1],振动系统主要是研究者所选定的研究对象;激励则是外界对系统的初始干扰及强迫力等;响应是系统在激励作用下所产生的运动。

当人体受到振动激励时会以复杂的方式响应,由于复杂系统本身会存在多个峰值,根据本研究测试结果(表1和图3)显示每个受试部位均有两个规律性明显的峰值,其臀大肌、小腿三头肌两个部位同一峰值基本一致且无统计学差异(表2和表3),针对此情况认为臀大肌、小腿三头肌频率是一致的,其各自的第一峰值判定为其固有频率(分别是8.25、8.12 Hz),而频率较高的第二峰值则可能与其骨骼或骨骼肌肉连接处等刚度相对较高的响应有关。本实验仅关注于固有频率,认为其应是外部激励作用于肌肉组织时影响最明显的频率值,并能够在最短时间内产生最大效应^[15-18]。

本实验结果显示,振动激励后正常组、模型组、麻醉组3组不同状态下的大鼠相同部位的固有频率其均值有差异但不构成统计学意义,因此可认为肌

肉组织固有频率是其本身的响应,其不随所处状态的不同而发生很大的变化;而同一组别中臀大肌、小腿三头肌上下两个部位的固有频率亦无明显差异,这可能是由于臀大肌、小腿三头肌同属于同一下肢肌肉组织,其组织结构基本一致所致。

机械振动是机械和结构产生的振动,各种机械设备、人体等都可以看成是一种结构物。将机械振动作为一种治疗方法作用于人体时是利用振动因素使人体局部组织或全身发生周期性或非周期性的往复变化以产生治疗效果^[19]。一定频率的振动作用下能够促使患处的神经肌肉性能产生急性及恒久效应^[20],适宜的外部机械振动作用于人体能够最大程度激活神经肌肉系统,使病理状态下的神经肌肉能够恢复至正常状态^[21]。将固有频率作为参考频率,设置不同频率的振动治疗对照组,围绕本实验研究方向探讨外部机械振动激励对坐骨神经损伤的最佳振动频率,以期产生最佳治疗效果。

【参考文献】

- [1] 刘延柱, 陈文良, 陈立群. 振动力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1998: 5-30.
LIU Y Z, CHEN W L, CHEN L Q. Vibration mechanics[M]. Beijing: Higher Education Press, 1998: 5-30.
- [2] 杨光瑜, 周继红, 尹志勇. 低频共振对大鼠生理功能影响研究[J]. 医用生物力学, 2011, 26(2): 163-167.
YANG G Y, ZHOU J H, YIN Z Y. Effects of low frequency resonance on physiological function of rats [J]. Journal of Medical Biomechanics, 2011, 26(2): 163-167.
- [3] 张文通. 生物谐振影响脊髓运动神经元兴奋性的电生理研究[D]. 南京: 南京医科大学, 2013.
ZHANG W T. Electrophysiological study on the effects of bioresonance on the excitability of spinal motor neurons [D]. Nanjing: Nanjing Medical University, 2013.
- [4] LIAO L R, LAM F M, PANG M Y, et al. Leg muscle activity during whole-body vibration in individuals with chronic stroke[J]. Med Sci Sports Exerc, 2014, 46(3): 537-545.
- [5] 张园园. 人体肌肉生物谐振刺激的初步研究[D]. 南京: 南京医科大学, 2012.
ZHANG Y Y. Preliminary study on human muscle bioresonance stimulation[D]. Nanjing: Nanjing Medical University, 2012.
- [6] 许光旭, 顾绍钦, 孟殿怀, 等. 生物谐振规律对步行效率影响的前驱研究[J]. 中国康复医学杂志, 2008, 23(12): 1092-1094.
XU G X, GU S Q, MENG D H, et al. A pre-research on the influence of biological resonance law on walking efficiency[J]. Chinese Journal of Rehabilitation Medicine, 2008, 23(12): 1092-1094.
- [7] 杨超. 三穴三法调节细胞自噬促进SNI大鼠运动功能恢复的机理研究[D]. 北京: 北京中医药大学, 2018.
YANG C. Mechanism of "Three Methods and Three Points" intervention of autophagy to promote motor function recovery in SNI rats [D]. Beijing: Beijing University of Chinese Medicine, 2018.
- [8] 杨凯云, 孙佩佩, 武文亮, 等. Notch信号通路和miR-21在周围神经损伤修复中的交互作用机制[J]. 中国组织工程研究, 2018, 22(32):

- 5139-5144.
YANG K Y, SUN P P, WU W L, et al. Interaction mechanism of Notch signaling pathway and miR-21 in the repair of peripheral nerve injury [J]. Chinese Journal of Tissue Engineering Research, 2018, 22(32): 5139-5144.
- [9] 史智君, 严隽陶, 孔亚敏. 振动疗法在康复中的应用及其影响因素 [J]. 中国医学物理学杂志, 2019, 36(1): 108-113.
SHI Z J, YAN J T, KONG Y M. Application of vibration therapy in rehabilitation and its influencing factors [J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2019, 36(1): 108-113.
- [10] GIGO-BENATO D, RUSSO T L, TANAKA E H, et al. Effects of 660 and 780 nm low-level laser therapy on neuromuscular recovery after crush injury in rat sciatic nerve [J]. Lasers Surg Med, 2010, 42(9): 673-682.
- [11] 范启中. 现代手外科显微手术学 [M]. 北京: 人民军医出版社, 1994: 353.
FAN Q S. Modern hand surgery microsurgery [M]. Beijing: People's Military Medical Press, 1994: 353.
- [12] 伊娜. 不同频率电针对急性坐骨神经损伤大鼠 L₄-L₅ 脊髓中 Bcl-2、Eax 及 P53 的表达影响 [D]. 沈阳: 辽宁中医药大学, 2016.
YI N. Effects of different frequency on the expression of Bcl-2, Eax and P53 in spinal cord of L₄-L₅ rats with acute sciatic nerve injury [D]. Shenyang: Liaoning University of Chinese Medicine, 2016.
- [13] 李巍巍, 苑秀华, 杨坚, 等. 超短波治疗对大鼠坐骨神经钳夹伤后运动功能、MCV 及血管内皮生长因子表达的影响 [J]. 中国康复, 2010, 25(6): 423-425.
LI W W, YUAN X H, YANG J, et al. Effects of ultrashort wave therapy on motorfunction, MCV and vascular endothelial growth factor expression after sciatic nerve clamp injury in rats [J]. Chinese Journal of Rehabilitation, 2010, 25(6): 423-425.
- [14] DING X, TANG J, HUA Y, et al. Expression of VEGF and neural repair after alprostadi treatment in a rat model of sciatic nerve crush injury [J]. Neurol India, 2009, 57(4): 387.
- [15] DI GIMINIANI R, TIHANYI J, SAFAR S, et al. The effects of vibration on explosive and reactive strength when applying individualized vibration frequencies [J]. J Sports Sci, 2009, 27(2): 169-177.
- [16] CARLUCCI F, ORLANDO G, HAXHI J, et al. Older age is associated with lower optimal vibration frequency in lower-limb muscles during whole-body vibration [J]. Am J Phys Med Rehabil, 2015, 94(7): 522-529.
- [17] GIOMBINI A, MACALUSO A, LAUDANI L, et al. Acute effect of whole-body vibration at optimal frequency on muscle power output of the lower limbs in older women [J]. Am J Phys Med Rehabil, 2013, 92(9): 797-804.
- [18] LABANCA L, LAUDANI L, MENOTTI F, et al. Asymmetrical lower extremity loading early after anterior cruciate ligament reconstruction is a significant predictor of asymmetrical loading at the time of return to sport [J]. Am J Phys Med Rehabil, 2016, 95(4): 248-255.
- [19] 王颖. 机械振动疗法及其在康复治疗中的应用 [J]. 中国康复医学杂志, 2004, 19(8): 633-636.
WANG Y. Mechanical vibration therapy and its application in rehabilitation therapy [J]. Chinese Journal of Rehabilitation Medicine, 2004, 19(8): 633-636.
- [20] 符之富. 振动治疗结合超声波治疗膝关节侧副韧带损伤的临床观察 [D]. 哈尔滨: 黑龙江中医药大学, 2017.
FU Z F. Clinical observation of vibration therapy combined with ultrasound in the treatment of knee collateral ligament injury [D]. Harbin: Heilongjiang University of Traditional Chinese Medicine, 2017.
- [21] NOLLET F, BEELEN A, SARGEANT A J, et al. Submaximal exercise capacity and maximal power output in polio subjects [J]. Arch Phys Med Rehabil, 2001, 82: 1678-1685.

(编辑: 陈丽霞)