

力量训练交叉迁移及在康复中应用的研究进展*

朱秀华^{1,2,3} 黄力平^{1,2,3,4} 李磊^{1,2,3} 杨丰铭^{1,2,3} 詹少凡^{1,2,3} 杜金刚³ 曹龙军^{1,2,3}

目前已有大量研究发现经过4—12周单侧的随意收缩(包括等长收缩、等张收缩和等动收缩),肌肉电刺激,想象的肌肉收缩,电针刺特定穴位和手针刺特定穴位等训练和治疗^[1-3],不仅可以增加训练侧的肌肉力量,对侧未训练的同源肌肉力量也有明显的增加,该现象被称为力量训练的交叉迁移。交叉迁移现象既可发生于上肢肌群,如肩袖肌群、肘屈伸肌群、腕屈伸肌群和第一骨间背肌等^[4-7],也可发生于伸膝肌群、踝跖屈肌群和踝背屈肌群等下肢肌群^[8-10]。随着研究的不断进展,力量训练交叉迁移的理念和技术在康复治疗临床实践中已有所应用,并取得明显的康复疗效。

1 交叉迁移现象的特点研究

交叉迁移现象存在下述一些特点:①当肌力测量与训练采取相同的收缩方式时,交叉迁移现象最为明显,也就是说当测量肌力方式与训练侧肢体肌力的训练方式相同时,对侧未训练肢体的肌力增加是最大的,这也符合运动训练的专门化原则,如等长训练后以等长力量测试效果最佳,其他方式也是如此^[8]。②单侧肌力训练采取离心收缩时,增加对侧同源肌肉的力量显著高于以向心收缩方式进行的训练。数据显示经过12周的训练后,离心收缩训练增强对侧股四头肌的肌力是向心收缩训练的3倍;不仅如此,离心收缩训练产生交叉迁移现象的时间也显著短于向心收缩训练,离心收缩训练6周可增强对侧同源肌肉肌力的40%,而向心收缩训练则需要12周才能达到相似的训练效果^[8]。③相较于随意的离心收缩而言,以肌肉电刺激方式进行的单侧训练更能显著增加训练侧和未训练侧肢体的肌肉力量,经过相同的训练周期,以肌肉电刺激进行的训练可增强训练侧与未训练的肌力分别为177%和104%,而随意收缩训练增强同侧与对侧的肌力分别为54%和23%^[11]。④虽然单侧电针和手针特定穴位均可提高对侧同源肌肉的力量,但两者在肌力提高的幅度上并不相同。经过6周的单侧针刺足三里和下巨虚,电针刺刺激可提高对侧踝背屈肌肌力32%,手针刺刺激则可提高49%,手针刺刺激对于对侧肌力的提升大于电针刺刺激方式^[3]。⑤目前已

经发现通过运动想象产生的力量训练交叉迁移现象可发生于小指外展肌群中,如4周的单侧运动想象训练,可增加同侧、对侧的小指外展肌力分别为22%和10%^[12]。同时肘屈肌群和踝背屈肌群同样可以通过运动想象的训练方式来增加肌力,但是否存在交叉迁移现象则尚未可知^[13-14]。⑥交叉迁移的大小与训练侧肢体肌肉力量的增长是成比例的,训练对侧增长的肌力约为同侧肌力增长的60%^[1,15]。

2 交叉迁移现象的临床应用研究

基于交叉迁移的上述特点,目前对于交叉迁移的临床研究主要集中于外科手术肢体固定期的康复和脑卒中后的偏瘫康复。

2.1 在骨科康复中的应用

研究表明在健康成年人中,人为地固定一侧肢体后,对未固定的肢体进行3周的训练,可维持对侧固定肢体的肌力不发生明显降低,但如果不对未固定的肢体进行训练,3周后对侧固定的肢体肌力则下降了14.7%^[16]。师东良等^[17]在临床实验研究中表明,交叉迁移的理念和技术可用于克雷氏骨折患者制动期的康复治疗中,通过健侧手握力训练和腕关节活动度训练可显著提高固定的患手拆除石膏后功能。不仅如此,有大量研究表明单侧肢体的关节、肌肉发生损伤时,其损伤和功能障碍可累及双侧肢体,导致健侧功能下降^[18-19],提示对未损伤肢体进行训练可能是预防其发生的重要措施之一。

2.2 在脑卒中后偏瘫中的应用

虽然不明机制,但对健侧针刺治疗脑卒中后偏瘫已有很多的应用^[20]。黄力平等^[21-22]在动物实验研究中发现,脑卒中后超早期健侧电针穴位治疗较患侧治疗能够更早地促进大脑中动脉阻塞大鼠神经功能的恢复,减少患侧脑梗死体积,并且健侧电针穴位治疗能更早更大程度地诱发脑缺血皮质胰岛素生长因子-1(IGF-1)mRNA表达增高,蛋白含量增高持续较长时间。于俊海等^[10]在此基础上进一步研究发现早期健侧和患侧电针穴位均能有效促进双侧皮质脑源性神

DOI:10.3969/j.issn.1001-1242.2015.08.026

*基金项目:天津市高校创新团队基金;国家科技支撑计划(2012BAK21B00)

中国教师发展基金会“关爱特教园丁”专项基金(2014GATJYD_Y06);中国教师发展基金会“关爱特教园丁”专项基金(2014GATJYD-Y06)

1 天津体育学院,300381; 2 天津市运动生理学与运动医学重点实验室; 3 天津市康复医学研究所; 4 通讯作者

作者简介:朱秀华,女,硕士研究生在读; 收稿日期:2014-09-18

经营养因子(BDNF)mRNA的表达上调,且健侧电针治疗较患侧治疗能更大幅度地提高缺血皮质BDNF mRNA的表达,这都提示早期健侧电针穴位治疗能更好地启动缺血皮质神经修复再生过程。Dragert等^[23]2013年研究发现对脑卒中偏瘫患者健侧肢体的踝背屈肌进行6周的等长抗阻收缩训练,可使偏瘫侧踝背屈肌的力量增加31.37%,有助于改善偏瘫患者的步行能力。脑卒中后,由于一侧脑损伤,导致两侧大脑间平衡遭到破坏,人体对称性的功能需求,如下肢步行,要求两侧间平衡恢复。2014年有综述总结交叉迁移现象可恢复肢体间的对称性,用于骨科损伤和脑卒中后偏瘫的康复治疗^[24],进一步地提供了交叉迁移临床应用的证据。

3 交叉迁移现象的机制研究

目前对于交叉迁移现象产生的机制尚无定论,但共识是产生交叉迁移现象时对侧同源肌肉并没有发生明显的肥大,对侧同源肌肉力量的增长主要是由于神经方面的原因。在交叉迁移现象的产生过程中,脑和脊髓发挥了重要的作用^[1]。

3.1 力量训练交叉迁移的肌源性机制

Bezerra等^[25]研究表明单侧力量训练使对侧同源肌肉力量增加的同时并没有改变其横截面积,即对侧同源肌肉并没有发生明显的肌肉肥大现象。曹龙军等^[26]进一步研究发现单侧电刺激大鼠腓肠肌增加双侧腓肠肌力量,但并不改变对侧同源肌肉胰岛素生长因子-1(IGF-1)不同变构体和成肌分化因子(MyoG)的基因表达水平,表明交叉迁移现象可能并不是由于肌源性机制所致。

3.2 力量训练交叉迁移的神经机制

3.2.1 随意收缩训练产生的交叉迁移机制:Hortobagyi等^[27]2003年观察到左上肢随意收缩训练可改变右上肢记录到的运动诱发电位幅度和H反射的兴奋性,表明脑和脊髓均参与了随意收缩产生的交叉迁移现象。2007年有研究表明,经过6周的右手尺偏最大等长收缩训练后,未训练的左手尺偏肌群等长收缩时,对侧大脑皮质的第一运动皮质区和第一感觉皮质区激活区域与训练前相比明显增加,同时出现了左侧颞叶的激活^[28]。Hortobagyi等^[29]又于2009年研究发现对第一运动皮质区施加1Hz的低频重复性经颅磁刺激可明显减弱由训练产生的力量增加,进一步说明了第一运动皮质区在力量训练过程中发挥的重要作用。以经颅磁刺激为测量方法的研究发现,单侧力量训练增加双侧肢体力量的同时可降低训练侧大脑半球向未训练侧大脑半球信号的抑制性传递,增加训练肢体同侧运动皮质的兴奋性,降低双侧皮质脊髓束的抑制性传递^[30-32]。在脑损伤后可塑性理论中,健侧脑皮质功能替代、两侧脑皮质间兴奋性的协调、脑细胞间突触信息传递效率的改变等都是其研究结论,上述交叉迁移的研究结果也与脑可塑性理论一致,提示其可应用于偏瘫治疗^[33]。有研究

发现单侧踝背屈力量训练产生交叉迁移现象时,改变了H反射的兴奋性,说明脊髓的可塑性在下肢踝背屈力量的交叉迁移中发挥了一定的作用^[34]。除了上述的功能性变化,Palmer等^[35]2013年研究发现经过4周的踝跖屈肌单侧等长收缩力量训练后,对侧大脑的白质和灰质发生了结构性的变化,但同侧脑白质及灰质并未发生明显的结构变化,从这一结果可间接推测脊髓在对侧肌力增长中发挥了不可或缺的作用。

在健康成年人中,人为地固定一侧肢体后,对未固定的肢体进行训练,可维持对侧固定肢体的肌力不发生变化^[16],这也属于交叉迁移的一种。该现象的机制尚不十分清楚,但脑的调节机制在该过程中发挥了重要作用。已有研究表明,对未固定的肢体进行力量训练后,未训练的固定肢体对侧大脑半球运动皮质区的激活区域增加^[36]。进一步研究发现训练后固定侧肢体的皮质脊髓束兴奋性传递不变,但如果不对未固定的肢体进行训练,皮质脊髓束兴奋性传递则显著降低^[37],表明训练未固定肢体保持了固定侧对应皮质脊髓束的兴奋性,避免了肌肉萎缩。

如上研究结果表明,随意收缩训练产生交叉迁移现象时,脑和脊髓同时发生了一些适应性的变化,参与其神经调节过程。其可能的传导通路为:单侧力量训练首先激活了训练对侧大脑半球的运动皮质区,随后信号经胼胝体等半球间信号传导通路传递至训练同侧大脑半球的运动皮质区,引起训练同侧皮质兴奋,而对侧相应皮质抑制,然后信号经皮质脊髓束下行传导至脊髓前角运动神经元,同时,在此过程中脊髓的兴奋性改变,其内部神经元活动发生变化,使脊髓运动神经元保持一定的兴奋性状态,支配肌肉收缩,保持肌肉功能。

3.2.2 穴位针刺产生的交叉迁移机制:已经发现单侧电针和手针针刺下肢足三里和下巨虚穴位时可同时增加双下肢踝背屈肌肌力,电针提高刺激侧与非刺激侧踝背屈肌肌力分别为35%和32%,手针提高46%和49%^[3]。大量研究表明单侧针刺足三里穴位确实可以改变人脑双侧第一运动皮质区和运动相关皮质区的血流动力学和神经元活动^[38-41]。比较发现针刺和经皮穴位电刺激足三里穴位均可以改变人脑运动皮质区的脑电复杂度,但针刺效果比经皮穴位电刺激更为明显^[42],单侧足三里和下巨虚的电针刺激和经皮电刺激均可以激活双侧与运动相关的脑区,但电针比经皮电刺激激活的双侧脑区更广泛些^[43]。研究发现脑功能性网络在针刺前后均表现出小世界网络特性,并且针刺穴位可调节脑功能性网络信息传递的效率^[44],针刺前脑功能性网络的连接较少,而针刺右侧足三里穴中及针刺后连接明显增多,并且增加的连接多为左脑区域与右脑区域间的长连接^[45],进一步比较发现,捻针频率为100次/min和150次/min时大脑间功能联系的数目达最大^[46]。Hui等^[47]2007年研究指出针刺穴位时产生的“得

气”感觉传递中传导速度较慢的C类神经纤维和A δ 神经纤维发挥了主要的作用,这也为针刺效果的交叉迁移神经机制提供了证据。

由此表明,针刺特定穴位产生交叉迁移现象的过程中,神经调节机制发挥了重要的作用。针刺的“得气”感觉经慢传导感觉纤维向上传递,使感觉与运动皮质区的兴奋性发生变化,且左脑与右脑之间的信息传递增加,但具体的信号传导通路以及脊髓在此过程中发挥的作用尚不清楚。

3.2.3 肌肉电刺激产生的交叉迁移机制:Hortobagyi等^[11]研究发现电刺激左下肢的股四头肌6周可使右下肢股四头肌肌力增加104%,周石等^[15]分析其原因可能在于脊髓在该交叉迁移现象中发挥了主要的作用,可能的机制为强烈的皮肤刺激诱发了脊髓水平的交叉伸展反射,即同侧屈肌兴奋而伸肌抑制,对侧屈肌抑制但伸肌兴奋。Hortobagyi等^[48]2011年分析认为电刺激训练使双侧肌肉力量增加,而对侧并没有产生明显的肌肉肥大,其主要是通过神经机制进行调节,可能的过程为电刺激激活了大脑皮质的感觉皮质、运动皮质和半球间的传导通路。

因此,肌肉电刺激产生交叉迁移现象的过程中,神经调节机制占主导地位,但具体的信号传递过程还需要进一步地研究。

3.2.4 运动想象训练交叉迁移机制:Yue等^[12]1992年第一次发现经过4周的单侧小指外展肌群运动想象收缩训练可使双侧小指外展肌力得到明显的增加,产生交叉迁移现象。其后相继有研究显示经过12周的运动想象训练,肘屈肌力增加了13.5%^[13],经过4周的运动想象训练,踝背屈肌力可增加17.13%^[14],但是否可产生交叉迁移现象尚未可知。目前对于运动想象产生交叉迁移机制的研究并不丰富,已有的研究显示运动想象训练使肌力增加的同时与运动相关的脑区发生了电位活动的变化^[13],且运动想象与随意训练激活的脑区存在相同的部分^[49]。

由此说明,虽然目前对于运动想象产生交叉迁移的机制还不能形成统一论,但可以肯定的是该训练效果的产生与中枢神经系统关系密切。

4 未来研究方向

Farthing等^[50]研究发现在右利手的健康成人中,如果对右上肢进行力量训练,6周后左上肢同源肌肉的力量可发生显著增加达39.2%,但如果对左上肢进行力量训练,6周后右上肢同源肌肉的力量并未发生明显改变,因而认为交叉迁移现象是单方向的,只能从优势侧肢体向非优势侧肢体转移。这与Vidal等^[51]2014年的研究成果存在相一致的地方,即运动可调节两大半球间的相互联系,但调节作用与大脑半球的优势性密切相关。交叉迁移的这种单向性在其他肌群,其

他力量训练方式中是否同样存在,及该单向性的机制尚需进一步地探索。

Sariyildiz等^[52]2011年研究发现对一侧腕屈肌进行电刺激下的离心收缩训练,6周后不仅对侧腕屈肌肌力有明显的增加,腕伸肌肌力也有明显的增加,认为交叉迁移不仅局限于对侧的同源肌肉,也可发生在其拮抗肌中。但这种现象是否普遍存在及其发生的机制还有待验证。

比较Farthing等2009年与2011年的研究结果发现3周的右腕关节尺偏等长收缩训练增加训练侧的肌力为23.8%,而3周的右手抓握等长收缩训练增加的肌力为10.7%,即尺偏训练增加的力量大于抓握训练增加的力量。对于一般人来说,尺偏动作的熟练程度明显小于抓握动作,推测以不熟练的动作进行力量训练,其增加的肌力大于以熟练的动作进行训练增加的肌力。这与Wright等^[53]2012年的研究成果在某种程度上存在一致性,即当个体执行技巧运动变得熟练之后,在运动皮质中与该项技巧运动准备相关的特定区域兴奋性水平有所下降。该推测在交叉迁移现象中是否成立还需要进一步研究。

虽然对交叉迁移现象发生的机制已有很多的研究,但尚无统一论,其机制尚需更进一步的探索,而探明该机制对改善脑卒中、骨科运动康复治疗方法具有重要意义。同时对于交叉迁移的理念在康复治疗中的应用也需要更进一步深入研究。

5 小结

力量训练交叉迁移现象可通过随意收缩、肌肉电刺激、针刺特定穴位、运动想象等多种训练方式产生,训练周期一般为4—12周,其不仅可发生于大的抗重力肌,也可发生手部的小肌肉。交叉迁移的理念和技术可用于单侧肢体损伤的骨科康复中,也可用于脑卒中、脑损伤后的偏瘫康复中,并能取得明显的康复疗效。交叉迁移现象发生的机制还未形成统一的定论,共识的一点是对侧同源肌肉并未发生肌肉肥大,其力量增加主要是通过神经调节机制完成,脑和脊髓在此过程中发挥了重要的作用,但具体的神经调节机制还需要进一步的研究加以完善。

参考文献

- [1] Hortobagyi T. Cross education and the human central nervous system[J]. IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine, 2005, 24(1): 22—28.
- [2] Huang LP, Zhou S, Lu Z, et al. Bilateral effect of unilateral electroacupuncture on muscle strength[J]. J Altern Complement Med, 2007, 13(5): 539—546.
- [3] Zhou S, Huang LP, Liu J, et al. Bilateral effects of 6 weeks' unilateral acupuncture and electroacupuncture on an-

- kle dorsiflexors muscle strength: a pilot study[J]. Arch Phys Med Rehabil, 2012, 93(1): 50—55.
- [4] Magnus CR, Boychuk K, Kim SY, et al. At-home resistance tubing strength training increases shoulder strength in the trained and untrained limb[J]. Scand J Med Sci Sports, 2014, 24(3): 586—593.
- [5] Magnus CR, Barss TS, Lanovaz JL, et al. Effects of cross-education on the muscle after a period of unilateral limb immobilization using a shoulder sling and swathe[J]. Journal of Applied Physiology, 2010, 109(6):1887—1894.
- [6] 齐燕,师东良,曹龙军,等. 腕关节等张屈伸训练的交叉迁移效果研究[J].中国康复医学杂志, 2010, 25(5): 425-429.
- [7] Hortobágyi T, Richardson SP, Lomarev M, et al. Interhemispheric plasticity in humans[J]. Med Sci Sports Exerc, 2011, 43(7): 1188—1199.
- [8] Hortobágyi T, Lambert NJ, Hill JP. Greater cross education following training with muscle lengthening than shortening[J]. Medicine & Science in Sports & Exercise, 1997, 29(1): 107—112.
- [9] Cabric M, Appell HJ. Effect of electrical stimulation of high and low frequency on maximum isometric force and some morphological characteristics in men[J]. International Journal of Sports Medicine, 1987, 8(4): 256—260.
- [10] 于俊海,肖娜,向珩,等.早期电针对局灶性脑缺血大鼠双侧皮质脑源性神经营养因子表达的影响[J].中国康复医学杂志, 2015,30(2): 122—126.
- [11] Hortobágyi T, Scott K, Lambert J, et al. Cross-education of muscle strength is greater with stimulated than voluntary contractions[J]. Motor Control, 1999, 3(2): 205—219.
- [12] Yue G, Cole KJ. Strength increases from the motor program comparison of training with maximal voluntary and imagined muscle contractions[J]. Neurophysiology, 1992, 67(5): 1114—1123.
- [13] Ranganathan VK, Siemionow V, Liu JZ, et al. From mental power to muscle power—gaining strength by using the mind[J]. Neuropsychologia, 2004, 42(7): 944—956.
- [14] Sidaway B, Trzaska AR. Can mental practice increase ankle dorsiflexor torque[J]. Physical Therapy, 2005, 85(10): 1053—1060.
- [15] Zhou S. Chronic neural adaptations to unilateral exercise: Mechanisms of cross education[J]. Exercise and Sport Sciences Reviews, 2000, 28(4): 177—184.
- [16] Farthing JP, Krentz JR, Magnus CR. Strength training the free limb attenuates strength loss during unilateral immobilization[J]. Journal of Applied Physiology 2009, 106(3): 830—836.
- [17] 齐燕,师东良,曹龙军,等. 早期健肢家庭训练方案在克雷氏骨折康复中的应用[J]. 中国康复医学杂志, 2010, 25(1): 79—80.
- [18] Hart JM, Pietrosimone B, Hertel J, et al. Quadriceps activation following knee injuries: a systematic review[J]. Journal of Athletic Training, 2010, 45(1): 87—97.
- [19] Song Y, Forsgren S, Yu J, et al. Effects on contralateral muscles after unilateral electrical muscle stimulation and exercise[J]. PLoS One, 2012, 7(12): e52230.
- [20] Kim MK, Choi TY, Lee MS, et al. Contralateral acupuncture versus ipsilateral acupuncture in the rehabilitation of post-stroke hemiplegic patients: a systematic review[J]. BMC Complementary and Alternative Medicine, 2010, 10:41.
- [21] 黄力平,向珩,肖娜,等. 早期电针刺激局灶性脑缺血大鼠健侧肢体的康复效果[J].中国康复医学杂志, 2012, 27(9): 808—812.
- [22] 肖娜,向珩,黄力平,等. 早期穴位电针治疗对局灶性脑缺血大鼠脑缺血皮质胰岛素样生长因子-1表达的影响[J]. 中华物理医学与康复杂志, 2014, 36(1):16—20.
- [23] Dragert K, Zehr EP. High-intensity unilateral dorsiflexor resistance training results in bilateral neuromuscular plasticity after stroke[J]. Exp Brain Res, 2013, 225(1): 93—104.
- [24] Farthing JP, Zehr EP. Restoring symmetry: clinical applications of cross-education[J]. Exercise and Sport Sciences Reviews, 2014, 42(2): 70—75.
- [25] Bezerra P, Zhou S, Crowley Z, et al. Effects of unilateral electromyostimulation superimposed on voluntary training on strength and cross-sectional area[J]. Muscle & Nerve, 2009, 40(3): 430—437.
- [26] 曹龙军,黄力平,周石,等. 单侧电刺激训练对双侧同源肌肉生长因子 mRNA 表达的影响[J]. 中国康复医学杂志, 2009, 24(2): 103—106.
- [27] Hortobágyi T, Taylor JL, Petersen NT, et al. Changes in segmental and motor cortical output with contralateral muscle contractions and altered sensory inputs in humans[J]. J Neurophysiol, 2003, 90(4): 2451—2459.
- [28] Farthing JP, Borowsky R, Chilibeck PD, et al. Neurophysiological adaptations associated with cross-education of strength[J]. Brain Topogr, 2007, 20(2): 77—88.
- [29] Hortobágyi T, Richardson SP, Lomarev M, et al. Chronic low-frequency rTMS of primary motor cortex diminishes exercise training-induced gains in maximal voluntary force in humans[J]. J Appl Physiol, 2009, 106(2): 403—411.
- [30] Hortobágyi T, Richardson SP, Lomarev M, et al. Interhemispheric plasticity in humans[J]. Med Sci Sports Exerc, 2011, 43(7): 1188—1199.
- [31] Kidgell DJ, Stokes MA, Pearce AJ. Strength training of one limb increases corticomotor excitability projecting to the contralateral homologous limb[J]. Motor Control, 2011, 15(2): 247—266.
- [32] Latella C, Kidgell DJ, Pearce AJ. Reduction in corticospinal inhibition in the trained and untrained limb following unilateral leg strength training[J]. Eur J Appl Physiol, 2012, 112(8): 3097—3107.
- [33] Graziadio S, Tomasevic L, Assenza G, et al. The myth of the 'unaffected' side after unilateral stroke: is reorganisation

- of the non-infarcted corticospinal system to re-establish balance the price for recovery[J]. *Exp Neurol*, 2012, 238(2): 168—175.
- [34] Dragert K, Zehr EP. Bilateral neuromuscular plasticity from unilateral training of the ankle dorsiflexors[J]. *Exp Brain Res*, 2011, 208(2): 217—227.
- [35] Palmer HS, Haberg AK, Fimland MS, et al. Structural brain changes after 4 wk of unilateral strength training of the lower limb[J]. *Applied Physiology*, 2013, 115: 167—175.
- [36] Farthing JP, Krentz JR, Magnus CR, et al. Changes in functional magnetic resonance imaging cortical activation with cross education to an immobilized limb[J]. *Med Sci Sports Exerc*, 2011, 43(8): 1394—1405.
- [37] Pearce AJ, Hendy A, Bowen WA, et al. Corticospinal adaptations and strength maintenance in the immobilized arm following 3 weeks unilateral strength training[J]. *Scand J Med Sci Sports*, 2013, 23(6): 740—748.
- [38] 金香兰,尹岭,姚斌,等. 针刺足三里穴中枢作用机制的研究[J]. *中国康复理论与实践*, 2003, 9(3): 60—62+74—75.
- [39] 王苇,漆剑频,夏业玲,等. 人脑运动皮质对针刺足三里和阳陵泉反应的功能性磁共振成像研究[J]. *中华物理医学与康复杂志*, 2004, 26(8): 26—29.
- [40] 肖叶玉,吴仁华,裴仁全,等. 针刺足三里穴磁共振功能成像的初步探讨[J]. *实用放射学杂志*, 2004, 20(2): 106—108.
- [41] 吴志远,缪飞,项琼瑶,等. 针刺足三里对磁共振脑功能成像影响的研究[J]. *中国中医药科技*, 2007, 14(5): 305—307+303.
- [42] 孙玉. 基于脑电非线性动力学分析的中医针刺疗法和经皮穴位电刺激疗法研究[D]. 浙江大学硕士毕业论文2007.
- [43] Marcelo Seed. Acupuncture: concept and Physiology: An fMRI investigation on brain activity in response to unilateral acupuncture, electroacupuncture and electromyostimulation on ST36 and ST39 (Huang LP). InTech online publisher, 2011(ISBN: 978-953-307-410-8).
- [44] Liu B, Chen J, Wang J, et al. Altered small-world efficiency of brain functional networks in acupuncture at ST36: a functional MRI study[J]. *PLoS One*, 2012, 7(6): e39342.
- [45] 李诺,王江,邓斌,等. 针刺对脑功能性网络连接的影响[J]. *针刺研究*, 2011, 36(4): 278—287.
- [46] Luo XL, Wang J, Han CX, et al. Characteristics analysis of acupuncture electroencephalograph based on mutual information Lempel—Ziv complexity[J]. *Chinese Physics B*, 2012, 21(2): 028701.
- [47] Hui KK, Nixon EE, Vangel MG, et al. Characterization of the "deqi" response in acupuncture[J]. *BMC Complement Altern Med*, 2007, 7(1): 33.
- [48] Hortobagyi T, Maffiuletti NA. Neural adaptations to electrical stimulation strength training[J]. *Eur J Appl Physiol*, 2011, 111(10): 2439—2449.
- [49] Lafleur MF, Jackson PL, Malouin F, et al. Motor learning produces parallel dynamic functional changes during the execution and imagination of sequential foot movements[J]. *Neuroimage*, 2002, 16(1): 142—157.
- [50] Farthing JP, Chilibeck PD, Binsted G. Cross-education of arm muscular strength is unidirectional in right-handed individuals[J]. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 2005, 37(9): 1594—1600.
- [51] Vidal AC, Banca P, Pascoal AG, et al. Modulation of cortical interhemispheric interactions by motor facilitation or restraint[J]. *Neural Plast*, 2014, 2014: 210396.
- [52] Sariyildiz M, Karacan I, Rezvani A, et al. Cross-education of muscle strength: cross-training effects are not confined to untrained contralateral homologous muscle[J]. *Scand J Med Sci Sports*, 2011, 21(6): 359—364.
- [53] Wright DJ, Holmes P, Di Russo F, et al. Reduced motor cortex activity during movement preparation following a period of motor skill practice[J]. *PLoS One*, 2012, 7(12): e51886.

(上接第844页)

- 复前后钙磷代谢和骨密度的影响[J]. *中国康复医学杂志*, 2012, 27(11): 1021—1025.
- [3] Onishi T, Shimada K, Sato H, et al. Effects of phase-cardiac rehabilitation on mortality and cardiovascular events in elderly patients with stable coronary artery disease[J]. *Circ J*, 2010, 74(4): 709—714.
- [4] 刘洵,林青华,李淑荣,等. 冠心病患者运动中心率-收缩压双乘积与血乳酸浓度和ST段水平的关系[J]. *中国康复医学杂志*, 2013, 28(8): 735—738.
- [5] Goel K, Lennon RJ, Tilbury RT, et al. Impact of cardiac rehabilitation on mortality and cardiovascular events after percutaneous coronary intervention in the community[J]. *Circulation*, 2011, 123: 2344—2352.
- [6] 苏懿,王磊,张敏州. 急性心肌梗死的流行病学研究进展[J]. *中西医结合心脑血管病杂志*, 2012, 10(4): 467—469.
- [7] Kim C, Kim DY, Lee DW. The impact of early regular cardiac rehabilitation program on myocardial function after acute myocardial infarction[J]. *Ann Rehabil Med*, 2011, 35(4): 535—540.
- [8] Aamot IL, Moholdt T, Amundsen BH, et al. Onset of exercise training 14 days after uncomplicated myocardial infarction: a randomized controlled trial[J]. *Eur J Cardiovasc Prev Rehabil*, 2010, 17: 387—392.