·综述·

卒中后失语症康复和手功能的关系研究进展*

潘涌泉[1] 贾 杰[1,2]

语言是人类社会中约定俗成的用以交流的符号系统,它包括对符号的表达和理解,也包括对文字语言符号的书写、阅读及姿势语言和哑语。大脑病变或损伤后可致语言功能的受损或丧失,导致获得性的语言障碍,又称失语症。约20%—40%的脑卒中患者可出现卒中后失语症(post-stroke aphasia,PSA),失语症的类型和严重程度主要取决于脑卒中的部位和程度,以及白质区域的完整程度[1]。据统计,约92%的脑卒中幸存者同时存在多种功能障碍,其中约有24%的患者同时存在失语症及偏瘫[2],严重影响了患者的日常生活质量。

卒中后失语症患者的语言功能恢复是一个缓慢的呈非线性改变的动态过程。卒中后3个月内语言功能可在一定程度上得到自发恢复,但多数患者遗留不同程度的慢性语言功能障碍。鉴于亚急性期和慢性期的语言功能康复与神经可塑性及语言功能网络重组密切相关,慢性失语症患者在经典的言语—语言治疗中获益有限[3]。且非侵入性脑刺激等具前景的技术尚未在足够样本量或随机对照的临床试验中进行验证,临床上亟需一种新的康复治疗模式对该类患者进行高效康复。研究发现,Broca区域作为语言中枢之一,同时与运动功能相关[4];而运动神经元损伤患者同时存在语言障碍[5],均间接反映了语言功能与运动功能之间远超过了脑功能区血液供应的关系。近年来,手功能[6]基于手与上肢的各项功能性结构,受中枢调控和周围神经支配,在临床实践和试验中逐渐得到重视和推广,失语症和手功能障碍的发生及康复治疗日益也受到国内外学者的关注。针对合并多种功能障碍的患者,可结合其在行为学及神经科学上的联系,进行综合高效康复方案的探索。因此,本文主要对语言功能与手运动功能的关系研究进展进行梳理,并依据当前的研究现状,讨论手功能在失语症语言康复中的作用,为制定适用于合并以上两种功能障碍的患者的康复方案,优化临床治疗方案提供理论基础参考。

1 语言的手势起源

语言的起源存在着各式各样的假说。部分学者认为,人类开始直立行走后,身体姿势的变化使口咽部结构的进化逐渐完善,这在语言的发展中发挥了关键作用[7]。语言的“手势说”认为,语言进化是由手的自由活动所推动[8]。Lameira等[9]指出,若无人类的口咽部结构完善和上肢手神经肌肉系统对运动的控制,人类语言无法实现如此丰富交流方式的飞跃。

2 语言功能与手运动功能相联系的行为学证据

2.1 抓握运动

抓握运动因语言的起源研究和其在镜像神经元的发现而得到研究者的重视,是探索语言和手运动关系的一条重要途径。Gentilucci[10]以唇部运动学和声谱特性为考察指标,发现嘴/手的开合大小随手/嘴抓握物体尺寸的大小而增加,即手与嘴作为效应器存在运动上的联系。与闭合的元音[i]和辅音[t]均促进精确性抓取的闭合相比,同时产生开口元音[α]和辅音[k]可以促进力量性抓握动作的闭合。相应地,受试者执行或观察精确性抓握时,闭合性元音[i]的产生更加快速[11—12]。这些研究结果均提示手的抓握运动与嘴的开合存在相互影响,且与灵长类动物的摄食功能相关。在语言交流的进化过程中,这种手口协同作用的关系在新生儿的Babkin反射(Babkin reflex)中也有所体现。

一些研究以不同词性的词语为材料考察言语知觉对抓握运动的影响。Glover等[13]以形容词和名词为材料,发现词语知觉中存在隐含特征为“大”的词语(如苹果)时,受试者伸手抓取运动早期的最大抓握孔径大于隐含特征为“小”的词语(如葡萄),这表明抓握运动的早期阶段受到词语知觉的影响。张智君[14]则通过抓取二维图片或三维物体以诱发类似效应,发现图片知觉无词语知觉的语义效应。抓握运动虽受词义影响,但基本不影响知觉判断,只有与物体的某一属性有关联的词义才会影响抓握运动的不同阶段[15]。另外,抓握运动则主要通过影响言语任务的语义加工阶段来影响言语知觉和产生[16]。

总体来说,这些研究结果显示抓握运动与言语产生存在联系,以及在进行实物抓握过程中,词语知觉会影响抓握运动的早期阶段。

DOI:10.3969/j.issn.1001-1242.2021.09.022
*基金项目:国家重点研发计划(2018YFC2002300,2018YFC2002301)
1 复旦大学附属华山医院康复医学科,上海市,200040; 2 通讯作者
第一作者简介:潘涌泉,女,硕士研究生; 收稿日期:2019-10-23

2.2 伴随言语产生的手势

表象性手势是伴随具有特定内容的词产生的。一般可将表象性手势分为四类:描述物体的具体形状、运动和行为(图标手势),包含空间位置信息(指示手势),具有特定文化意义(象征手势)以及包含手部或肩部运动但无特定的意义(模糊手势/隐喻手势)。

为表明伴随言语产生的意义手势可促进言语加工,尤其是词汇的提取,Kelly[17]采用观看有声视频的形式,并要求受试者写下所听到的信息。研究发现,除了语音信息,文字记录内容还包括了手势所编码的信息,即手势不只是说话者的手部摆动或吸引他人的注意力。Hostetter[18]以卡通录像和文字形式呈现同一事件,比较两种情况下受试者描述事件时伴随的手势。结果发现观看卡通录像条件下产生更多的表象性手势,因此推论伴随言语产生的意义手势,即表象性手势有利于词汇的提取。此外,就传达语义而言,言语加工由独立的、具有分析性意义的成分构成;手势利用空间位置信息,将事件描述成为一个整体,使听众能更准确地把握所描述对象的大小及相对位置。这一系列的研究表明,伴随言语产生的手势所传达的语义信息对言语交流具有促进作用。

尽管伴随言语的手势对听者的理解和说话者言语的产生有诸多影响,手势的产生也受言语产生的完整性影响。为此,Sekine[19]通过眼睛追踪系统的头戴式显示器评估脑损伤后失语症患者的手势感知,发现失语症患者比健康者更能整体和稳定地使用表象性手势,且失语症严重程度和语言流畅性也对手势的产生有显著影响,研究者认为伴随言语的意义手势也许能够补偿语言功能障碍,并可能对词汇的检索有促进作用。

通过对伴随言语产生的手势研究发现,手势的产生和理解可对言语加工产生不同的影响。当手势与言语内容不一致时,两者的结合可以表征更多的信息,且伴随言语产生的意义手势在一定程度上可促进语义加工和词汇提取。

3 语言功能与手运动功能存在联系的神经学证据

人体随意运动的运动性冲动大部分产生于额叶的初级运动区(Brodmann 4区,或称M1)以及邻近的皮质区(一级运动神经元)。这些冲动经过较长的脊髓传导束(皮质核束和皮质脊髓束/锥体束)到达脑干以及脊髓前角,并且大多在此通过中间神经元交换到二级运动神经元。发出的运动性冲动经过脊髓前根、神经丛和周围神经到达肌肉,最后传导至运动终板区域。此外,还有其他的皮质区,如运动前区皮质(Brodmann 6区)和位于皮质下的核区,尤其是基底节,参与运动调控。他们与初级运动区和小脑共同构成复杂的反馈回路,在经过多个脊髓束影响前角细胞,调控运动和肌张力。

脑功能存在偏侧化。无论是左利手或是混合利手,多数人的语言优势半球仍为左半球,语言优势半球的额叶、顶叶和颞叶是语言功能区所在的主要位置。双侧大脑半球存在许多神经纤维连接,右半球作为非优势半球,在健康人中的语言功能中也发挥一定的作用[20]。双侧额下回和岛回负责从声音编码到词义信息加工的映射;双侧颞叶参与概念性知识的表达;双侧额下回和缘上回参与语音编码和言语产生。

传统的神经解剖认为小脑功能主要与运动控制有关。2001年Marien提出的“语言的小脑”则强调了小脑对于语言功能的作用。尽管仍有学者认为小脑病变患者的语言功能障碍局限于语言的运动方面,是失去与发声相关肌肉的协调性所致,但这不足以解释临床中小脑损伤后患者的语言功能障碍如语法缺失、失命名及言语流畅性下降等。此外,对卒中后运动性失语症患者加用小脑电刺激治疗者,其失语症状改善较常规康复及药物治疗更为明显,提示小脑电刺激能促进卒中后运动性失语症患者语言功能的改善,这可能与激活小脑—大脑皮层相关通路,调控语言的神经网络促进语言功能的恢复有关[21]。同样,小脑具有的语言功能也存在偏侧性,且与大脑半球语言优势之间存在交叉性[22]。由此进一步证实,小脑不仅与肢体运动相关,也参与语言流畅性、命名等语言功能。

3.1 镜像神经元(mirror neurons,MNS)

20世纪90年代,Rizzolatti[23]发现恒猴在观察其他个体(猴或人类)执行特定动作,如抓握运动时所兴奋的神经元与自身执行该动作时相似,这一类特殊的神经元被命名为镜像神经元,也被称为“脑中之镜”,位于恒猴大脑的前运动皮质腹侧(F5区)及顶下小叶[24]。MNS不仅在观察、执行与摄食相关的动作(如抓握、进食[25]等)时可被激活,对与目标动作相关的声音也极其敏感。例如,猴子通过特征性的声音“辨认”动作[26—28],或经视觉刺激后[29]的动作想象也可激活镜像神经元。这些研究提示镜像神经元的激活有利于动作的理解、执行和学习,无论是视觉可见的动作、特征性的声音抑或是动作想象。

人类大脑中同样存在镜像神经元,主要位于双侧额下回后部(左侧为Broca区)、顶下小叶,以及前运动皮质腹侧、辅助运动区和颞中回等区域[30]。其中,Broca区与猴脑的F5区存在同源性[31]。当说话者出现与语音意义不一致的手势致使听者理解困难,或阅读障碍者被要求阅读词句[32—33]时,Broca区的激活更加明显;此外,Broca区损伤可致患者出现动作观察和理解障碍[34],这也进一步证实MNS的激活有利于动作观察和理解。近年来,基于MNS理论下的动作模仿、运动想象及运动学习等研究大量开展[35],动作观察、运动想象、镜像疗法及脑—机接口技术等逐渐被用于上肢及手的运动功能康复。此外,动作观察疗法可通过激活MNS,促进大脑的

机能重组和皮质重塑,有效改善失语症患者的语言功能[36—37]。

这一系列研究表明,镜像神经元系统与重要的语言和运动功能区存在较多重叠。此外,在失语症康复过程中,语言功能区与编码手动作的脑区存在功能连接[38],MNS系统在其中发挥重要作用,这为卒中患者开展综合语言、运动功能的高效康复方案提供了结构基础。

3.2 手运动功能在语言康复中的作用

近年来,多学科研究从不同角度对语言功能和手运动功能之间的躯体皮层定位及功能联系进行探索。虽然研究设计的干预方案不一,但这些研究结果均提示,手运动功能在失语症语言康复中发挥重要作用。Holle等[39]以有声视频为研究材料,记录受试者观看视频中手势及听取目标词出现时的脑电图,结果发现,伴随言语的手势可以消除语义不明词语的歧义。同时,该研究中所观察到的N400效应说明了图标手势与言语诱发的语义处理过程相似,且图标手势在言语中存在消歧作用。一系列神经影像学研究[40—43]揭示言语的视知觉与执行上肢、手动作有着较多共同激活的脑区,其中左侧额下回及颞中回的激活尤为显著。

此外,还有研究关注了偏瘫肢体运动训练干预对卒中后失语症患者语言功能的改善作用。Harnish等[44]通过功能性磁共振(functional magnetic resonance imaging,fMRI)研究5例慢性期卒中患者在进行4周重复性任务性训练并结合硬膜外皮层刺激治疗后的双侧大脑半球皮质激活的偏侧性,结果显示,3例受试者的西方失语症成套量表中失语商显著改善,且双侧大脑半球皮质激活均增强。20世纪中叶,一些研究开始在全脑的参与下关注失语症的康复机制。其中多数研究表明,非优势半球干扰优势半球的皮质激活从而阻碍失语症的恢复;另有学者持有相反观点[45]。Crosson等[46]在一篇综述中很好地总结了左手动作训练对非流利性失语症患者命名时双侧大脑半球皮质激活的偏侧性,认为位于左半球的主要语言区损害后,部分语言功能将转移至右半球,且左手动作训练有助于命名功能的恢复,并利于语言产生过程中脑区激活转移至右侧大脑半球的次级语言区,这进一步证实了语言功能和上肢、手运动之间的功能联系。

随着科技革新,非侵入性脑刺激技术也被广泛应用到卒中患者的言语功能和运动功能研究和训练中。有研究[47]使用经颅直流电刺激(transcranial direct current stimulation,tDCS)探究初级运动皮层(M1)在语言理解,尤其是与动作相关词语的理解中的治疗作用。研究结果表明,M1-tDCS可不同程度地改善失语症患者偏瘫肢体的运动功能和语言交流功能,同时可提高动作相关词汇的检索功能,并可维持较长时间。研究者认为,所观察到的正向效应可能是tDCS对阳性电极下的运动皮层或其他区域的直接作用结果,也可能是M1-tDCS影响到言语产生任务功能相关的运动脑区,如运动前区。经颅直流电刺激是否能够通过刺激额下回促进手势—语言功能网络重组,各项研究结论不一,学者们也无统一定论,这仍需要进一步的研究证实[48]。

4 小结

卒中后亚急性期和慢性期的语言功能康复与神经可塑性及语言功能网络重组密切相关,这类患者在经典的失语症治疗方法如Schuell刺激法、阻断去除法及小组治疗等中获益受限。目前,语言功能和手运动功能之间存在行为学和脑科学的联系虽被广泛认可,但卒中后失语症患者在进行语言康复时,偏瘫侧上肢及手,甚至患者的双侧上肢几乎处于静止状态,尚未有康复治疗将手与上肢运动(如伸展、抓握、抬举运动等)康复训练应用于语言治疗中。未来研究可能需要更多地对失语症患者的联合语言—手运动康复方法进行研究,分析比较同时或者先后进行训练对语言和运动功能的恢复效果。此外,尚需要对卒中后失语症功能恢复进行更多的纵向性神经影像学研究,适当应用反馈机制,挖掘和制定适用于合并以上两种功能障碍患者康复疗效显著的方案。

参考文献

[1] Flowers HL, Skoretz SA, Silver FL, et al. Poststroke aphasia frequency, recovery, and outcomes: a systematic review and meta-analysis[J]. Arch Phys Med Rehabil, 2016, 97(12): 2188—2201.e8.

[2] Lawrence ES, Coshall C, Dundas R, et al. Estimates of the prevalence of acute stroke impairments and disability in a multiethnic population[J]. Stroke, 2001, 32(6):1279—1284.

[3] Kiran S. What is the nature of poststroke language recovery and reorganization?[J]. ISRN neurology, 2012, 2012:786872.

[4] Fadiga L, Craighero L. Hand actions and speech representation in Broca's area[J]. Cortex; a journal devoted to the study of the nervous system and behavior, 2006, 42(4): 486—490.

[5] Bak TH, Hodges JR. The effects of motor neurone disease on language: further evidence[J]. Brain Lang, 2004, 89(2): 354—361.

[6] 贾杰. 手功能康复概论[M]. 北京: 电子工业出版社, 2019.7.

[7] Bryant GA. The evolution of coordinated vocalizations before language[J]. Behavioral and Brain Sciences, 2014, 37 (6):549—550.

[8] Miyahara M, Kitada R, Sasaki A T, et al. From gestures to words: spontaneous verbal labeling of complex sequential hand movements reduces fMRI activation of the imitation-related regions[J]. Neuroscience research, 2013, 75(3):228—238.

[9] Lameira AR，Hardus ME，Nouwen KJ，et al. Population-specific use of the same tool-assisted alarm call between two wild orangutan populations (Pongo pygmaeus wurmbii) indicates functional arbitrariness [corrected] [J]. PLoS One，2013，8(7):e69749.

[10] Gentilucci M，Benuzzi F，Gangitano M，et al. Grasp with hand and mouth: a kinematic study on healthy subjects [J]. Journal of neurophysiology，2001，86(4):1685—1699.

[11] Tiainen M，Tiippana K，Vainio M，et al. Interaction in planning vocalizations and grasping[J]. Q J Exp Psychol (Hove)，2017，70(8):1590—1602.

[12] Vainio L，Rantala A，Tiainen M，et al. Systematic influence of perceived grasp shape on speech production[J]. PLoS One，2017，12(1):e0170221.

[13] Glover S，Rosenbaum DA，Graham J，et al. Grasping the meaning of words[J]. Exp Brain Res，2004，154(1):103—108.

[14] 张智君,唐日新. 知觉与行为分离现象在二维铁钦纳错觉实验中的验证[J]. 心理学报，2005，37(1):9—13.

[15] Gentilucci M. Object motor representation and language[J]. Exp Brain Res，2003，153(2):260—265.

[16] 朱明泉. 语言知觉和产生与抓握运动的相互影响[D]. 杭州:浙江大学，2006.

[17] Kelly SD，Kravitz C，Hopkins M. Neural correlates of bimodal speech and gesture comprehension[J]. Brain Lang，2004，89(1):253—260.

[18] Hostetter AB，Hopkins WD. The effect of thought structure on the production of lexical movements[J]. Brain Lang，2002，82(1):22—29.

[19] Sekine K，Rose ML，Foster AM，et al. Gesture production patterns in aphasic discourse: In-depth description and preliminary predictions[J]. Aphasiology，2013，27(9):1031—1049.

[20] Mitchell RL，Crow TJ. Right hemisphere language functions and schizophrenia: the forgotten hemisphere?[J]. Brain，2005，128(Pt 5):963—978.

[21] Starowicz-Filip A，Chrobak AA，Moskala M，et al. The role of the cerebellum in the regulation of language functions[J]. Psychiatria polska，2017，51(4):661—671.

[22] Marien P，Ackermann H，Adamaszek M，et al. Consensus paper: Language and the cerebellum: an ongoing enigma [J]. Cerebellum (London，England)，2014，13(3):386—410.

[23] Rizzolatti G，Fadiga L，Matelli M，et al. Localization of grasp representations in humans by PET: 1. Observation versus execution[J]. Exp Brain Res，1996，111(2):246—252.

[24] Bonini L，Rozzi S，Serventi FU，et al. Ventral premotor and inferior parietal cortices make distinct contribution to action organization and intention understanding[J]. Cerebral cortex (New York，NY：1991)，2010，20(6):1372—1385.

[25] Ferrari PF，Gallese V，Rizzolatti G，et al. Mirror neurons responding to the observation of ingestive and communicative mouth actions in the monkey ventral premotor cortex [J]. Eur J Neurosci，2003，17(8):1703—1714.

[26] Petrides M，Cadoret G，Mackey S. Orofacial somatomotor responses in the macaque monkey homologue of Broca's area[J]. Nature，2005，435(7046):1235—1238.

[27] Kohler E，Keysers C，Umilta MA，et al. Hearing sounds，understanding actions: action representation in mirror neurons[J]. Science (New York，NY)，2002，297(5582):846—848.

[28] Theoret H，Pascual-Leone A. Language acquisition: do as you hear[J]. Curr Biol，2002，12(21):R736—737.

[29] Rizzolatti G，Fogassi L，Gallses V. Neurophysiological mechanisms underlying the understanding and imitation of action[J]. Nature reviews Neuroscience，2001，2(9):661—670.

[30] Molenberghs P，Cunnington R，Matingley JB. Brain regions with mirror properties: a meta-analysis of 125 human fMRI studies[J]. Neurosci Biobehav Rev，2012，36(1):341—349.

[31] Rizzolatti G，Arbib MA. Language within our grasp[J]. Trends in Neurosciences，1998，21(5):188—194.

[32] Naito Y，Okazawa H，Honjo I，et al. Cortical activation during sound stimulation in cochlear implant users demonstrated by positron emission tomography[J]. The Annals of Otology，Rhinology & Laryngology Supplement，1995，166:60—64.

[33] Salmelin R，Service E，Kiesila P，et al. Impaired visual word processing in dyslexia revealed with magnetoencephalography[J]. Ann Neurol，1996，40(2):157—162.

[34] Fazio P，Cantagallo A，Craighero L，et al. Encoding of human action in Broca's area[J]. Brain，2009，132(Pt 7):1980—1988.

[35] Garrison KA，Winstein CJ，Aziz-Zadeh L. The mirror neuron system: a neural substrate for methods in stroke rehabilitation[J]. Neurorehabil Neural Repair，2010，24(5):404—12.

[36] 田丽,朱慧敏,刘莉,等. 基于镜像神经元理论的动作观察疗法对脑卒中后非流畅性失语的影响[J]. 中国康复医学杂志，2017，32(10):1152—1154.

[37] 由丽,王珧,田丽,等. 基于镜像神经元理论的动作观察疗法对脑卒中后言语失用的疗效观察[J]. 临床神经病学杂志，2018，31(6):429—432.

[38] Meister IG，Sparing R，Foltys H，et al. Functional connectivity between cortical hand motor and language areas during recovery from aphasia[J]. J Neurol Sci，2006，247(2): 165—168.

[39] Holle H, Gunter TC. The role of iconic gestures in speech disambiguation: ERP evidence[J]. Journal of Cognitive Neuroscience, 2007, 19(7):1175—1192.
[40] Hauk O, Johnsrude I, Pulvermuller F. Somatotopic representation of action words in human motor and premotor cortex[J]. Neuron, 2004, 41(2):301—307.
[41] Straube B, Green A, Weis S, et al. A supramodal neural network for speech and gesture semantics: an fMRI study [J]. PLoS One, 2012, 7(11):e51207.
[42] Xu J, Gannon P J, Emmorey K, et al. Symbolic gestures and spoken language are processed by a common neural system[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2009, 106(49):20664—20669.
[43] Wrynn AS, Mac Sweeney CP, Franconi F, et al. An in-vivo magnetic resonance imaging study of the olfactory bulbectomized rat model of depression[J]. Brain Research, 2000, 879(1—2):193—199.
[44] Harnish S, Meinzer M, Trinastic J, et al. Language changes coincide with motor and fMRI changes following upper extremity motor therapy for hemiparesis: a brief report[J]. Brain Imaging and Behavior, 2014, 8(3):370—377.
[45] Turkeltaub PE. Brain stimulation and the role of the right hemisphere in aphasia recovery[J]. Current Neurology and Neuroscience Reports, 2015, 15(11):72.
[46] Crosson B. An intention manipulation to change lateralization of word production in nonfluent aphasia: current status [J]. Seminars in Speech and Language, 2008, 29(3): 188—200; quiz C—4.
[47] Biou E, Cassoudesalle H, Cogne M, et al. Transcranial direct current stimulation in post-stroke aphasia rehabilitation: A systematic review[J]. Annals of Physical and Rehabilitation Medicine, 2019, 62(2):104—121.
[48] Buchwald A, Falconer C, Rykman-Peltz A, et al. Robotic arm rehabilitation in chronic stroke patients with aphasia may promote speech and language recovery (but effect is not enhanced by supplementary tDCS) [J]. Front Neurol, 2018, 9:853.

·综述·

按摩治疗的细胞力学效应及机制*

张莹莹[1,2,3] 邢阳辉[1,2,3] 宫 赫[4] 樊瑜波[4,5,6,7]

按摩治疗是一种著名的替代医疗形式,可以通过力学手法作用于受损、僵硬或疼痛部位的肌肉和结缔组织以减轻患者痛苦,并促进组织康复[1]。然而,临床上应用按摩治疗多依赖主观评估,缺少力学方面的定量研究和细胞水平的微观研究,制约了按摩治疗的发展与应用。本质上讲,按摩的治疗作用是一种力学刺激作用,研究按摩手法作用原理、阐明按摩刺激的作用机制以提高按摩治疗的临床疗效是当前按摩手法研究的主要任务之一[2]。目前,力学刺激对细胞生物学行为的影响是生物医学工程领域中的重要研究课题[3],将按摩刺激引入将有助于从细胞力学层面理解按摩治疗的效应及机制。

细胞是人体的基本功能单位,也是按摩刺激的最终作用靶点,研究细胞如何将按摩作用的特有力学信号转变为生物学信号,是阐述按摩治疗机理的关键。本文综述了按摩手法的细胞力学效应的主要研究进展,为从细胞水平探讨按摩对机体组织康复的机制研究提供思路和理论依据。

1 按摩刺激的力学形式及细胞力学加载装置

1.1 按摩刺激的力学作用形式

根据按摩手法作用力的方向来看,按摩治疗手法作用力

DOI:10.3969/j.issn.1001-1242.2021.09.023
*基金项目:国家自然科学基金项目(11902090,11902126);中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(2019)
1 国家康复辅具研究中心,北京,100176; 2 北京市老年功能障碍康复辅助技术重点实验室; 3 民政部智能控制与康复技术重点实验室; 4 北京航空航天大学; 5 北京市生物医学工程高精尖创新中心; 6 生物力学与力生物学教育部重点实验室; 7 通讯作者
第一作者简介:张莹莹,女,助理研究员; 收稿日期:2020-02-13