

# 姿势控制增龄化研究进展

王楚婕<sup>1</sup> 王 健<sup>1,2,3</sup>

姿势控制(postural control, PC)指控制身体在空间的位置以达到稳定性和方向性的目的<sup>[1]</sup>,即控制质心(centre of mass, CoM)与支撑面关系的能力和保持身体节段间、身体与动作任务环境间适当关系的能力。其控制通路涉及大脑、小脑、基底神经节、脑干和脊髓等多个神经结构,包含下意识的反馈控制、反馈控制和意识性的随意姿势控制等不同控制方式,并受年龄、疾病、生理状态(如疲劳)、心理负荷(如认知作业)的影响。年龄的增长往往伴随着身体结构和功能不同程度上的衰退。从外部表现来看,能够明显观察到老年人姿势控制能力减弱,如身体摆动增加、运动迟缓、步态不稳、协调能力减弱及动作精确性下降等。这些现象影响到老年人日常功能性活动,增加了跌倒的风险。而跌倒已被证实是导致老年人受伤和发病的主要原因,20%—30%有摔倒史的老人经受着中等到严重程度的伤痛<sup>[1]</sup>。研究衰老与姿势控制的关系,探讨姿势控制增龄化的规律和机制,对于制定改善和提高老年人姿势控制能力的相关策略具有重要理论意义。

## 1 感觉系统增龄化与姿势控制

姿势控制的一种模式为:感觉器官感知身体的移动,视觉、前庭觉、本体感觉信息通过传入神经传至中枢神经系统,由其整合后经传出神经将调控信息反馈给效应器——骨骼肌<sup>[2]</sup>。前庭觉、视觉、本体感觉是与姿势控制关联最大的感觉信息<sup>[3]</sup>。Peterka<sup>[4]</sup>采用“感觉通道权重因子模型”发现,这三种感觉信息在姿势控制中的比重大约各占1/3。前庭系统主要参与空间定向与空间知觉,提供头在重力和惯性力方面的位置及运动信息。Rosenhall<sup>[5]</sup>证实了70岁以上老人的耳石比年轻人少40%以上,而耳石的减少将导致前庭器官功能的衰退。视觉提供头相对于周围物体的位置和运动的信息。老年人视力、视觉分辨率、视觉空间感及视敏度下降<sup>[6]</sup>,且比年轻人更加依赖视觉<sup>[7]</sup>。但是增龄过程中眼睛结构改变,可以到达视网膜上的光线减少,视域就随之升高。视觉的供求不平衡导致老年人运动表现不佳。本体感觉是本体感受器(腱器官和肌梭)对肢体和躯干相对于脚底支撑面的位置及运动状态的感觉。Pyykkö等<sup>[8]</sup>证实本体感觉能力随年龄的增长而减弱,使老年人姿势调控变得困难。

## 2 中枢神经系统增龄化与姿势控制

灰质结构中,主运动皮质和躯体感觉皮质的厚度随增龄而减小<sup>[9]</sup>。主运动皮质的萎缩与运动迟缓有关;躯体感觉皮质的萎缩则可能和平衡能力的下降和对视觉更加依赖有关。此外,与肢体协调和平衡有关的小脑的体积会随衰老而减少<sup>[9]</sup>。

白质结构中,胼胝体是连接两个大脑半球的结构。研究发现,尽管老年人胼胝体完整性与年轻人相比有明显变化,完成动作任务的表现与年轻人却没有显著不同。核磁共振成像结果显示:完成相同任务时,①老年人大脑呈现双侧激活,包括双侧小脑前叶、前运动皮质、顶叶、左侧前额叶和扣带回后部;②在年轻人中不被激活的脑区在老年人中呈激活态;③同样被激活的脑区,老年人表现出更高的激活水平<sup>[9]</sup>。

对于激活增加的现象,研究者提出退行性变化(dedifferentiation)和代偿机制(compensatory)两种解释。退行性变化指运动皮质的双侧激活导致了更差的运动表现。Bernard等<sup>[10]</sup>研究健康年轻人和老年人的手部运动,年轻人优势手的运动激活对侧相应脑区,同时抑制同侧脑区的活动,以减少非优势手的无意识摆动。而老年人则呈现双侧激活,使非优势手产生无意识摆动,不利于双手动作的协调。代偿机制指运动皮质的双侧激活优化了运动表现。Heuninckx等<sup>[11]</sup>让年轻人和老年人在有或无视觉反馈条件下完成手脚同向和反向屈伸,核磁共振成像结果显示,无论在何种视觉条件下,老年人的辅助运动皮质(SMA)、扣带回区(CMA)、额叶岛盖和次级体感觉区(S2)都呈现较大激活;而年轻受试者的这几个脑区只在无视觉反馈时显著激活。上述几个区域的作用是综合躯体感觉信息来指导运动,使动作更加协调,说明在有或无视觉反馈时它们都在帮助老年人协调运动,故为代偿机制。

## 3 肌肉骨骼系统增龄化与姿势控制

肌肉骨骼系统作为维持姿势和实施动作的效应器,其增龄性变化同样影响到姿势控制。许多研究者指出,肌力流失是导致老年人姿势控制不佳的原因,包括与生物衰老进程一致的骨骼肌肉质量、力量和品质(muscle quality)的下降<sup>[12]</sup>。从40岁起,肌肉质量平均每10年流失5%,65岁以后流失加

DOI:10.3969/j.issn.1001-1242.2013.05.026

1 浙江大学体育科学与技术研究所; 2 浙江大学理学院心理与行为科学系; 3 通讯作者  
作者简介:王楚婕,女; 收稿日期:2012-09-06

速<sup>[2]</sup>。肌纤维类型转换、数量减少和横截面积(CSA)缩小使肌肉质量下降,并和营养、新陈代谢、细胞改变、神经冲动发放的变化共同导致肌力减弱<sup>[13]</sup>。有研究认为尽管CSA萎缩,如果单位面积肌力(force/CSA)不下降,就不能说肌肉功能下降了<sup>[14]</sup>。单位面积肌肉力量即肌肉品质,与离心峰力矩密切相关<sup>[15]</sup>。研究20—80岁男性和女性的手臂及腿部运动的离心峰力矩发现,只有男性有显著的年龄相关的减退<sup>[12,15-16]</sup>。

#### 4 神经肌肉系统增龄化与姿势控制

##### 4.1 神经肌肉系统控制姿势的模式

神经肌肉控制系统由高级神经中枢、脊髓神经中枢及肌肉运动系统3部分组成。

高级神经中枢对姿势的控制包括预期姿势调整(anticipatory postural adjustments, APAs)和补偿性姿势调整(compensatory postural adjustments, CPAs)两种模式。APAs是一种前馈控制模式,指在干扰可预期的前提下,中枢神经系统提前预测了可能产生的身体移动而对效应器提前发出指令,使姿势肌肉先于原发动肌(focal muscle)50—100ms开始活动,以减小干扰的负面影响<sup>[17-18]</sup>。CPAs属于反馈调节模式,即在干扰开始后,原发动肌和姿势肌依据外界干扰引起的感觉反馈(视觉、前庭觉、本体感觉)产生的姿势控制<sup>[19-20]</sup>。

##### 4.2 静态站立维稳能力

人体双足站立姿势由反馈机制实现,其目标就是使CoM在支撑面上的投射——压力中心(center of pressure, CoP)维持在一定范围内<sup>[4,17,21]</sup>。

Sheldon<sup>[22]</sup>观察6—80岁的个体发现,60岁以后,人在静态站立时将自发摆动减小到最少存在困难,且最近有摔倒史的老人摇摆次数最多。Nagai等<sup>[23]</sup>比较了老年人和年轻人在站立、够物和迈步中的平衡能力。其中,静态站立时两组受试者的姿势摆动面积差异显著,且该面积与肌肉共激活指数显著正相关。同时,表面肌电(sEMG)信号显示,在年轻人正常站立时活动水平较低的胫骨前肌在老年人中激活程度大大增加,表明老年人依靠增加肌肉共激活来稳定姿势。但Wolfson<sup>[24]</sup>却发现健康老年人和年轻人站立时身体摆动次数只有3%的差异,没有显著性意义。

此外,研究者还分别比较了睁闭眼和光滑度不同的站立表面对静态平衡的影响<sup>[25]</sup>。睁眼状态下,老年人CoP的总移动面积和侧向转动范围显著增加,其他参数(包括总平均速度、总位移均方根值、振幅均方根值、移动速度均方根值)的年龄差异不显著。闭眼时,除总平均速度外,老年人CoP的其他参数均明显大于年轻人。静止站立时感觉传入信息由视觉和本体感觉提供,闭眼意味着关闭了视觉通道,只能依赖本体感觉。上述结果再次说明老年人对视觉的依赖更强。站立在表面光洁的平台上,老年人的姿势摆动和年轻人

没有显著差异,如果改为泡沫包裹的平台,老年人的摆动速度则为年轻人的2倍,表明脚底支撑面的光滑度和任务需求也是影响静态平衡的因素。

##### 4.3 应对干扰的反馈调节能力

影响姿势稳定或平衡的干扰可以来自周围环境,如脚底支撑面突然移动、突发加载负荷等,也可以来自动作执行者自发的随意运动,如快速举臂、抬腿、迈步等。二者都会在身体内部产生使CoM移动的力,从而威胁姿势稳定<sup>[19,25]</sup>。

对于突发的外界干扰,老年人姿势肌反应时显著长于年轻人。Hwang等<sup>[26]</sup>从固定高度释放小沙包创造突发性上肢加载,比较年轻人和老年人椎旁肌肉sEMG信号和运动学数据。实验发现,年龄对躯干多裂肌和竖脊肌活动的延时(latency)有显著影响,但因突发加载而产生的躯干弯曲力矩没有年龄差异。反应时长于年轻人,说明老年人无法对突发干扰做出准确快速的反应。躯干弯曲力矩没有年龄差异的原因可能是老年人后背腰椎结构柔韧性降低对变弱了的脊柱稳定性起到了补偿作用,即增加的肌肉僵硬有助于减小躯干弯曲的程度;也可能是沙包的重量尚不够使两组被试表现出显著差异。Allum等<sup>[27]</sup>分析不同年龄人群在足底力台突然旋转或倾斜时踝部、躯干和上臂的sEMG信号,发现老年人踝部肌肉开始进行平衡纠正的时间比青年人延迟20—30ms,且初始肌肉活动程度较小,在240ms之后才变大。此外,青年人显示出较早的、更大的、与力台旋转方向相反的躯干运动,但老年人的旋转调整动作和椎旁肌的牵张反射不明显。另外,王少君<sup>[2]</sup>运用足底干扰力台诱发侧向失衡,sEMG数据显示老年人肌电振幅达到峰值所用的时间更长,表明他们无法在尽可能短的时间内募集足够的运动单位进行肌肉收缩。

应对突发失衡,老年人表现出和年轻人不同的策略。正常情况下,年轻受试者主要采取髋部策略应对突发侧向失衡,即由髋部外展肌-内收肌产生力矩,快速移动CoM。此时,踝部无法充分产生力矩。而在突发前后向失衡时,踝部策略占主导地位,即身体像一个倒钟摆,围绕着踝关节这个中心活动<sup>[28]</sup>。老年人在侧向失衡和前后向失衡时采取的稳定策略却恰好颠倒过来。王少君<sup>[2]</sup>在突发侧向失衡的实验中发现,老年人多数依靠胫骨前肌和竖脊肌,即踝关节和躯干来维持稳定。随着增龄,人的踝关节肌力变弱,本体感觉功能丧失,并不能有效帮助老年人在侧向失衡后恢复稳定。有趣的是,老年受试者三角肌的反应时和振幅达最大峰值的时间都比年轻组快,暗示了他们会通过增加上肢的活动来维持稳定,或者希望采取抓扶策略来改变支撑面,这与Allum等<sup>[27]</sup>的研究结果一致。此外,突发干扰情境中,突然的肌肉牵张可令主动肌和拮抗肌共同收缩,以达到固定关节、减少关节活动的目的。Woollacott等<sup>[1]</sup>通过运动平台制造失衡发现,老

年人(61—78岁)某些关节主动肌和拮抗肌的共同激活比健康青年人(19—38岁)更频繁。有研究者认为,共激活随增龄而增大是为了提高僵硬性,以弥补神经运动系统的增龄性损伤,如肌肉力量减弱、张力产生速度变慢、快肌纤维减少等<sup>[23]</sup>。然而,也有人指出,过大的共收缩会增加能量消耗,易导致疲劳,潜在地增加跌倒的风险。衰老本身伴随着肌肉僵硬度的增加,共收缩只会降低关节活动的自由度,不利于快速做出反应<sup>[29]</sup>。

#### 4.4 前馈控制能力

当干扰可预期时,姿势肌会在干扰作用于身体前,产生与反应方向相反的力和力矩,以减小受到干扰后的运动幅度<sup>[19]</sup>。干扰的可预期程度越低,APAs水平就越低,运动开始后的CPAs的反应就越强烈<sup>[30]</sup>。

前馈控制机制对维持躯体稳定的作用最早在随意运动中被研究。任何随意运动,尤其是快速的,都是自己施加的可被中枢神经系统预期的姿势干扰<sup>[31]</sup>。在这种自发的干扰之前,无论年轻人还是老年人的姿势肌,都呈现APAs<sup>[30,32]</sup>。

Man'kovskill等<sup>[1]</sup>最早研究了年龄对执行随意运动的影响。他们发现由于姿势肌激活变慢,老年人随意运动的发起比年轻人晚。类似现象在Krishnan等<sup>[20]</sup>、Stelmach等<sup>[33]</sup>的研究中也得到证实,但是在低速或中速的举臂运动中,老年人不表现出任何的姿势不稳。另外,Olafsdottir等<sup>[34]</sup>发现老年人姿势肌APAs活动程度也显著低于年轻人。可能因为中枢神经系统不愿意产生很强的APAs以避免本来就脆弱的平衡状态再受到另一种干扰的影响。“另一种干扰”指会产生一定力和力矩的APAs。

对于APAs和CPAs间隔时间的年龄差异,研究者们持不同观点。Man'kovskill等<sup>[1]</sup>注意到随年龄增加,姿势肌与原发动肌开始活动的时间差值不断变小,尤其是90岁的老年人,其姿势肌与原发动肌几乎同时活动,这可以解释老年人姿势不稳的外部表现。然而,也有研究者发现尽管APAs减弱了,老年人却可以和年轻人在同样的速度下完成运动,因为中枢神经系统会在老年人身体达到足够抵抗外界干扰的准备状态后,才激活原发动肌。相应地,随意运动的发起就推迟了,即时间间隔不变或延长<sup>[35]</sup>。

Bleuse等<sup>[35]</sup>对上述第2种观点给出的解释是:老年人采取了其他策略来确保动作的完成。他们要求受试者以慢、中和快3种速度自己举臂,并采取外力诱发最大速度举臂。sEMG数据显示,在自发快速举臂运动中,年轻人肌肉激活的顺序由肢体远端向近端推进的,而这个顺序在老年人中颠倒,即大腿肌肉早于小腿肌肉被激活。另外,年轻人只有同侧比目鱼肌受到抑制,而老年人的比目鱼肌呈现双侧抑制。对于外部诱发的举臂运动,两组受试者肌肉激活顺序均为由远及近,但老年人大腿肌肉激活更频繁,说明随着干扰可预

期程度的降低,老年人需要增加髋部肌肉的激活来补偿不充分的APAs。

目前,研究前馈控制的实验范式还包括睁闭眼条件下的上肢加/减载实验<sup>[19,26]</sup>和有无心理预期条件下的力台滑动/倾斜<sup>[32]</sup>实验。Hwang等<sup>[26]</sup>研究了青年人和老年人在睁眼(有预期)和闭眼(无预期)两种情况下竖脊肌和多裂肌对突上肢加载的反应。结果显示,椎旁肌在小沙包下落触碰到受试者手中的托盘前就被激活。有预期时,年轻人和老年人的肌肉反应时都缩短、躯体弯曲角度和弯曲力矩都变小,但这一现象受到增龄的影响,即年龄越大,预期的作用越小。由此可以推断,衰老削弱了前馈控制能力,使肌肉无法在干扰前做好充分的准备,增加了跌倒的风险。对于老年受试者,预期对减少竖脊肌和多裂肌反应时的作用存在差异。有预期时,老年人竖脊肌反应时缩短比无预期时显著,但在多裂肌则不明显。原因可能是突然加载时,属于整体稳定肌的竖脊肌会比局部稳定肌多裂肌更早被激活。

综上所述,由于衰老,人们在快且有效地进行预先姿势调整上存在困难。然而,研究者对该现象是否会导致老年人的动作表现明显差于年轻人尚未达成一致。有人认为CPAs的推迟是由于APAs启动推迟所致,以便姿势肌达到足以抵抗可预期的干扰的准备水平。因而,尽管老年人在干扰后的动作完成情况不如年轻人,但差异并不显著。相反观点指出,老年人姿势肌APAs的强度变弱,使身体无法提前充分地做好准备,导致原动肌在CPAs阶段活动强度增大,不利于稳定和平衡的维持。

## 5 认知任务与老年人姿势控制

双任务指被试同时完成认知任务和动作任务。双任务中,任务表现的衰退总是存在的,与年龄无关。但老年人的表现比完成同样任务的年轻人明显更差<sup>[1,10]</sup>。具体来说,CoP位移的范围更大;从失衡恢复到初始平衡态用时更长。

老年人由于肌力流失和感觉功能衰退,动作控制时对注意的需求增加,即需要额外的认知资源来辅助任务的完成。认知任务不仅影响老年人姿势的维持,也影响认知任务的业绩。Lindenberge等<sup>[36]</sup>要求年轻人、中年人和老年人在行走的同时背单词,发现与行走不背单词相比,边走边背单词不仅使中年人和老年人的行走速度变慢,而且单词记忆的准确性降低。

衰老过程中动作控制从低水平的、自动化控制转变为高水平的注意控制。前额叶皮质在高水平的认知任务中起重要作用。依据“last in, first out”假说<sup>[9]</sup>,前额叶皮质最先开始衰老,而老年人又需要依赖前额叶皮质的认知辅助,这样的矛盾必然影响到姿势任务和动作任务的表现。

## 6 小结

即使老年人没有显著的疾病特征,其姿势控制能力仍有一定程度的衰退。与姿势控制有关的感觉系统、中枢神经系统和肌肉骨骼系统随增龄发生生理上的退化,导致老年人无法充分地维持姿势。老年人的前馈控制能力明显减弱,表现为 APAs 的延迟。但是,关于 APAs 的增龄化是否推迟了 CPAs 启动的时间,研究者尚未得出一致结论。了解老年人姿势控制能力的增龄化表现、明确其中的机制可为选择和制定有效的干预策略提供有力的理论支持,有助于改善和提高老年人日常生活质量。研究老年人前馈控制能力多以随意运动,即内部干扰为范式。事实上,外界干扰也是造成老年人跌倒的主要原因之一。从而,关注可预期的外界干扰,以心理预期和视觉线索这两个影响外界干扰条件下的 APAs 的因素为自变量,研究衰老过程中前馈控制能力的变化,进而探讨其与姿势控制增龄化之间的关系将逐渐成为神经科学领域关注的重点。

## 参考文献

[1] Shumway-Cook A, Marjorie HW. 毕胜,燕铁斌,王宁华译.运动控制原理与实践[M]. 第3版.北京:人民卫生出版社. 2009.

[2] 王少君. 老年人侧向姿势控制能力下降的机制及太极拳锻炼效果的研究[D]. 天津:天津体育学院, 2009.

[3] Lee HK, Scudds RJ. Comparison of balance in older people with and without visual impairment[J]. Age Ageing, 2003, 32(6): 643—649.

[4] Peterka RJ. Sensorimotor integration in human postural control[J]. J Neurophysiol, 2002, 88(3): 1097—1118.

[5] Rosenhall H. Degenerative changes in the ageing human vestibular geriatric neuroepithelia[J]. Acta Otolaryngol, 1973,76: 208—220.

[6] 张玉, 陈蔚. 老年跌倒研究概况与进展[J]. 中国老年学杂志, 2008, 28(9): 929—931.

[7] 赵芳, 周兴龙. 老年人站立及行走稳定性的生物力学研究[J]. 北京体育大学学报, 2003, 26(2): 188—191.

[8] Pyykkö I, Jäntti P, Aalto H. Postural control in elderly subjects[J]. Age Ageing, 1990, 19(3): 215—221.

[9] Seidler RD, Bernard JA, Burutolu TB, et al. Motor control and aging: Links to age-related brain structural, functional, and biochemical effects[J]. Neurosci Biobehav Rev, 2010, 34(5): 721—733.

[10] Bernard JA, Seidler RD. Evidence for motor cortex dedifferentiation in older adults[J]. Neurobiol Aging, 2011, 33(9): 1890—1899.

[11] Heuinckx S, Wenderoth N, Swinnen SP. Age-related reduction in the differential pathways involved in internal and external movement generation[J]. Neurobiol Aging, 2010, 31(2): 301—314.

[12] Doherty TJ. Invited review: Aging and sarcopenia[J]. J Appl Physiol, 2003, 95(4): 1717—1727.

[13] 沙继斌. 骨骼肌衰老的研究进展[J]. 山东体育学院学报, 2002, 18(2): 43—46.

[14] 满君, 孙桂云. 增龄骨骼肌的机能特征及运动的其影响[J]. 北京体育大学学报, 2001, 24(2): 200—207.

[15] Lynch NA, Metter EJ, Lindle RS, et al. Muscle quality. I. age-associated differences between arm and leg muscle groups[J]. J Appl Physiol, 1999, 86(1): 188—194.

[16] Lindle RS, Metter EJ, Lynch NA, et al. Age and gender comparisons of muscle strength in 654 women and men aged 20—93 yr[J]. J Appl Physiol, 1997, 83(5): 1581—1587.

[17] Massion J. Movement, posture and equilibrium: interaction and coordination[J]. Prog Neurobiol, 1991, 38(1):35—56.

[18] Bouisset S, Zattara M. Biomechanical study of the programming of anticipatory postural adjustments associated with voluntary movement[J]. J Biomech, 1987, 20(8):735—742.

[19] Santos MJ, Kanekar N, Aruin AS. The role of anticipatory postural adjustments in compensatory control of posture: 1. Electromyographic analysis[J]. J Electromyogr Kinesiol, 2010, 20(3): 388—397.

[20] Krishnan V, Latash ML, Aruin AS. Early and late components of feed-forward postural adjustments to predictable perturbations[J]. Clin Neurophysiol, 2011, 123(5): 1016—1026.

[21] Ting LH. Dimensional reduction in sensorimotor systems: a framework for understanding muscle coordination of posture[J]. Prog Brain Res, 2007,165: 299—321.

[22] Sheldon JH. The effect of age on the control of sway[J]. Gerontol Clin, 1963, 5:129—138.

[23] Nagai K, Yamada M, Uemura K, et al. Differences in muscle coactivation during postural control between healthy older and young adults[J]. Arch Gerontol Geriatr, 2011, 53(3): 338—343.

[24] Wolfson L, Whipple R, Derby CA, et al. A dynamic posturography study of balance in healthy elderly[J]. Neurology, 1992, 42(11):2069—2075.

[25] 李哲, 王健. 突发负荷变化条件下躯干肌肉运动控制策略[J]. 中国康复医学杂志, 2011, 26(6): 596—599.

[26] Hwang JH, Lee YT, Park DS, et al. Age affects the latency of the erector spinae response to sudden loading[J]. Clin Biomech, 2008, 23(1): 23—29.

[27] Allum JH, Carpenter MG, Honegger F, et al. Age-dependent variations in the directional sensitivity of balance corrections and compensatory arm movements in man[J]. J Physiol, 2002, 524(2):643—663.

[28] van Wegen EE, van Emmerik RE, Riccio GE. Postural orientation: Age-related changes in variability and time-to-boundary[J]. Hum Mov Sci, 2002, 21(1): 61—84.

[29] Osternig LR, James CR, Bercades D. Effects of movement speed and joint position on knee flexor torque in healthy and postsurgical subjects[J]. Eur J Appl Physiol Occup Physiol, 1999, 80(2):100—106.

[30] Brown SH, Haumann ML, Potvin JR. The responses of leg and trunk muscles to sudden unloading of the hands: implications for balance and spine stability[J]. Clin Biomech, 2003, 18(9):812—820.

[31] Aruin SA. The organization of anticipatory postural adjustments[J]. J Autom Contr, 2002, 12(1):31—37.

[32] Laessoe U, Voigt M. Anticipatory postural control strategies related to predictive perturbations[J]. Gait Posture, 2008, 28(1):62—68.

[33] Stelmach GE, Amrhein PC, Goggin NL. Age differences in bimanual coordination[J]. Gerontol, 1988, 43(1):18—23.

[34] Olafsdottir H, Zhang W, Zatsiorsky VM, Latash ML. Age-related changes in multifinger synergies in accurate moment of force production tasks[J]. Appl Physiol, 2007, 102:1490—1501.

[35] Bleuse S, Cassim F, Blatt JL, et al. Effect of age on anticipatory postural adjustments in unilateral arm movement[J]. Gait Posture, 2006, 24(2):203—210.

[36] Lindenberger U, Marsiske M, Baltes PB. Memorizing while walking: increase in dual-task costs from young adulthood to old age[J]. Psychol Aging, 2000, 15(3):417—436.