

· 讲座 ·

“运动学习”相关理论及其在脑性瘫痪康复中的应用

黄 真¹

随着脑功能研究及人类运动力学研究的不断深入,“运动学习(motor learning)”相关理论和方法越来越广泛地被应用到各种运动功能障碍的康复治疗中,尤其是中枢神经系统损伤导致的运动功能障碍,当然也包括儿童的脑性瘫痪(脑瘫)^[1-3]。“运动学习”方法是根据对正常人习得技能过程的充分认识,通过分析及与运动功能障碍相关的各种异常因素或缺失成分,针对性地设计并引导患者主动练习运动技能,促进脑功能重建,获得尽可能接近正常的运动技能。“运动学习”方法的实施关键在于对产生运动的神经控制及生物力学相关机制的理解,下面介绍一些相关理论。

1 运动控制(motor control)理论

1.1 神经网络理论(neural network theory)

过去认为神经系统对运动的控制是自上而下的,即等级理论(heirarchical theory),这种理论降低了“下”水平的重要性。目前取而代之的是神经网络理论,认为大量神经元之间交互连接组成复杂的网络体系,这种连接的牢固性因反复使用而增强,因废用而减弱。人类习得性运动就是在发育过程中,反复实践,在中枢神经系统逐渐形成复杂的“控制程序”并不断优化,这些控制程序促使了神经网络的形成。中枢神经系统不同的组成部分在网络的形成中起着不同的作用,比如脊髓是主要的输出和输入回路,但是,现在发现脊髓中也存在节律性运动的发生源(如对行走的控制);小脑在运动学习、平衡控制、反馈信息的调整等方面具有重要作用;间脑将来自脊髓、小脑和脑干等许多信息进行处理,然后传送至皮层的其他区域;基底节参与运动的策划和认知功能;大脑皮层主要将来自不同区域和途径的信息(如触觉、视觉、本体感觉)进行整合,并根据所执行任务的目的性和兴趣性发出指令,启动运动。

1.2 多系统理论(systems theory)

该理论强调运动的产生是多系统间相互作用的综合效应,如神经系统的认知能力、记忆能力、支配能力,肌肉骨骼系统的关节活动范围、软组织的延展性、肌肉收缩的力量,心肺系统的运动耐受能力;精神方面的心理行为状况,以及其他外源性因素等,这些因素协同作用决定运动的质量。这种协同具有较大的自由度和复杂性,但是经过反复实践,协同趋于简化,在执行某项任务时逐渐成为一个有机的整体。这与神经网络形成的理论是一致的,只是从不同的角度阐述。

2 运动学习理论

2.1 Schmidt 纲要理论(Schmidt's schema theory)

该理论认为小儿在运动发育过程中,会逐渐形成许多不同类型的运动模式,这些模式经过成功与失败的反复磨砺,最终优化形成节能而高效的运动程序或纲要,并在大脑中储

存记忆。当遇到新的任务时,具有相似运动力学的程序或纲要就被调出,指导任务的完成,同时也是程序再次调整的过程,由此不断完善。这种程序包括在某项运动中参与运动的肌肉的选择和分工、肌肉收缩的顺序、速度和力量等^[4-5]。Newell 将感知觉扩充到“纲要理论”之中,进一步强调感知觉在运动纲要形成中的重要性^[6]。

2.2 运动学习的三个阶段

一个新技能的学习过程可分为三个阶段,第一阶段称为认识期(cognitive stage),此时需要注意力高度集中,在引导下反复练习所学项目的要点,经过不断尝试,逐渐选择有效、舍弃无效的方法;第二阶段称为联系期(associative stage),是进一步发展运动技能也是优化运动纲要的过程;第三阶段称为自发期(autonomous stage),此时注意力已从动作本身转移到了对周围环境的关注上,而动作变成了自发性的反应。任何一项运动技能只有达到了第三阶段才算真正学会并形成了持久的记忆。

2.3 反馈在运动学习中的重要性

反馈分为内源性反馈和外源性反馈,内源性反馈是指反馈来自自身感觉,它需要更多感知能力、认知能力的参与,更有益于神经网络的形成和优化,对技能的掌握和独立性的培养十分重要;外源性反馈是指反馈来自外界,恰当的外源性反馈是内源性反馈的补充,有助于技能的改进和更好地理解内源性的反馈,但是应防止对外源性反馈产生依赖。因此,在提供外源性反馈时应延迟反馈并逐渐淡化。反馈还可分为结果性反馈和操作性反馈。比如,是否击中了目标,这是结果性反馈;而在未得到结果以前就已经感觉到所做动作是否准确,这就是操作性反馈。操作性反馈和内源性反馈在运动学习过程中更为重要,因为它们着眼于培养利用自身感觉反馈信息的能力,这样才能不断提高所学的技能,并以此方式去学习以后新的技能。

3 运动技能的发育

一项运动技能的形成离不开三方面因素的影响:生物力学、神经学和环境。例如:小儿抓握技能的发育过程受到自身因素如体重、环境因素如重力、以及针对任务目标所形成的神经支配等因素的影响。在这些因素的交互作用中小儿逐渐形成适应能力、预期性控制能力和协调运动能力^[7]。

3.1 适应能力(adaptability)

神经系统具有很强的适应性,即:随内在和外在的条件不断调整,逐步形成适应这些条件的运动技巧的能力。婴幼儿在运动发育中,通过掌握解决不同问题的一系列方法,他

1 北京大学第一医院物理医学与康复科, 100034

作者简介:黄真,副主任医师,副教授,硕士生导师

收稿日期:2007-03-08

们的适应能力得到发展, 神经系统因功能的需要不断“塑形”, 形成功能依赖性神经网络体系。例如: 当婴儿去拿不同方位的玩具时, 他需要学会调整不同的运动模式和使用不同的肌群来克服重力的影响, 在失败与成功的反复实践中逐渐形成有效的神经控制程序, 学会不同方位的够物技能。因此, 在不同环境条件下, 提供不同的物体, 有益于这种适应能力或神经可塑性的提高。

3.2 预期性控制能力(anticipatory control)

运动的控制需要反馈信息的输入, 同时也需要具有预期性控制能力, 即前馈(feed forward)。反馈是指运动过程中感觉信息的输入, 例如: 要去拿桌子上一杯水, 视觉信息首先输入大脑, 然后大脑发出指令, 控制上肢运动方向、手指张开的程度以及握杯的位置等。当手触到杯子时, 触觉将杯子的质地信息输入大脑, 大脑再控制肌肉收缩程度, 产生恰当的握力。但是, 只靠反馈是不够的, 还需要具备前馈信息, 这种信息是以往输入的感觉和实践经验所形成的记忆。例如: 第一次拿起一个又重又滑的杯子时可能会摔掉, 但是经过几次失败后再准备拿起同样的杯子时, 神经系统就会在拿杯子之前支配肢体使用更有效的握杯方式和力量以避免滑落。前馈在姿势控制和保持平衡方面也起着重要作用, 例如: 在上肢伸出够物之前, 脊柱稳定性肌肉(如腹横肌、多裂肌等)首先激活, 稳固躯干, 保持平衡, 为上肢运动做好准备。

3.3 协调运动能力

在发育过程中, 运动从单侧性运动过渡到双侧性运动, 再到随环境和目标的不同而产生的有选择性的单侧运动或双侧运动; 运动模式从不流畅变得更加协调, 尤其随着头和躯干稳定性的提高, 协调运动能力得到发展^[8-9]。例如: 5 个月小儿的够物动作常常出现多个速度峰值, 而 2 岁小儿的动作变得很平滑, 只有一个速度峰值; 5 个月小儿在拿物体时缺少前馈能力, 他们的手常常张得很大, 动作粗大, 而 9—13 个月时, 小儿能根据物体的大小, 在接触物体前将手打开到略大于物体, 并且手的张开与手的伸出之间有了更好的协调, 使动作更加流畅和准确。

运动功能障碍的小儿可能由于认知障碍、视觉障碍、肌肉骨骼系统异常、感觉异常等导致: 适应能力低下, 不能针对不同的任务形成有效的运动模式; 预期性控制能力低下, 运动变得延迟, 躯干不能预先准备好姿势, 易失去平衡; 协调性差, 常常表现为协同性运动模式^[10-13]。因此, 在康复治疗中需要分析影响运动功能的因素, 针对这些因素设计治疗方案, 以便提高他们的运动技能。

4 功能重建的机制

4.1 脑的可塑性

脑组织损伤后除了自然恢复过程外(如病灶周围水肿消退、血肿吸收、侧支循环建立、血管再沟通等), 功能的恢复主要依赖脑的可塑性(plasticity), 即通过残留部分的功能重组(functional reorganization)而非损伤组织的再生, 以新的方式完成已丧失的功能, 这种功能重建依赖于使用模式的反复输入和改良, 最终形成新的神经网络或程序, 所以也称之为使用依赖性功能重建^[14]。脑功能重组的主要方式包括: 靠近损伤

区正常轴突侧支长芽以支配损伤区域; 潜伏通路和突触启用; 病灶周围组织代偿; 低级中枢部分代偿; 对侧半球代偿; 由功能不同的系统代偿(如触觉取代视觉)等。当然不是所有脑损伤或损伤全部都可以功能重建, 它与许多已知和未知因素有关, 比如: 损伤部位、面积大小、程度, 有无认知功能障碍以及其他并发症, 康复治疗开始的早晚及有效程度, 年龄大小, 患者主动性及家庭成员参与程度等, 都会影响功能恢复的程度。

4.2 促进功能重建的因素

4.2.1 具体的而非抽象的训练项目或目标: 比如上肢够取物品, 这是一项具体的任务, 操作时涉及到视觉和触觉的输入, 大脑对信息的判断和整合, 以及神经对运动的有效支配等, 再经过失败和成功的反馈, 不断调整运动模式, 形成优化的神经网络和运动程序, 支配相关肌肉以特定的顺序、速度和力量等力学特点配合完成这项具体任务, 促进发展适应能力、前馈能力和协调能力。但是, 如果上肢只做屈伸或单纯前伸而无具体目标, 就会失去上述综合信息的输入和整合, 运动的力学特点也完全不同, 变成一项空泛的关节活动。如果是被动活动, 就相距更远了。

4.2.2 反复强化: 中枢神经系统的可塑性需要功能性活动的反复强化。近期有研究证明: 采用限制健侧而强迫使用患侧上肢时, 大脑室管膜下成神经细胞出现向病灶周围迁移, 同时病灶周围毛细血管增生; 而当解除限制后, 这种迁移减弱甚至消失^[15-16]。

4.2.3 兴趣性: 兴趣是一种强大的内在驱动力, 而内在驱动力是促进功能重建的好老师, 它可以提高神经网络的形成和优化。实验证明: 想象性训练可以兴奋相关的中枢支配区域, 躯体训练和想象训练的结合比单纯的躯体训练更能促进技能的掌握。

4.2.4 挑战性: 当技能的难度处于患者能力边缘时, 才会有失败和成功的体验, 神经网络和运动程序才能不断优化, 进步的速度才会提高, 过难或过易均不利于技能的学习。

4.2.5 社会交流性: 刚出生的小儿就开始了向周围人学习的过程, 患儿更需要与同龄人或能力相当的小儿交往, 从中学学习实际且丰富的各种能力, 包括社会参与能力。

4.2.6 醒觉程度: 中枢神经系统的醒觉程度是技能学习的基础和前提, 因此, 当出现意识障碍时, 早期丰富感觉的输入和促醒技术非常重要。

4.2.7 避免或减少损伤后的适应性改变(adaptation changes): 当中枢神经系统损伤后, 机体很快会在功能方面或结构方面出现继发性或适应性改变。研究发现: 中枢神经系统损伤引起的肌力减弱, 除了废用性力弱, 早期主要是由于下行传导兴奋的减少, 导致所支配肌肉的运动单位募集数量减少、激活速度减慢及同步性减弱, 从而造成肌肉收缩减慢减弱^[17]。另外, 适应性改变还包括: 软组织长度及柔韧性改变, 关节腔脂肪组织增生, 软骨萎缩, 韧带连接减弱及骨质疏松等。因此, 避免或减少适应性改变是功能重建的保障。

5 “运动学习”在脑性瘫痪康复治疗中的应用

近年来, 随着研究的不断深入, 对正常人运动形成和人

类力学特点的认识更加细化,有关瘫痪的康复治疗变得更加具有依据和方向。针对功能障碍的康复治疗如同疾病的药物治疗,首先需要了解正常功能的产生机制和特点,正如需要学习解剖学和生理学;其次要会分析异常功能的原因、机制和特点,正如需要了解病因学和病理学;最后需要掌握各种康复治疗方法的作用机制、适应证、禁忌证和注意事项,正如需要掌握药理学。只有这样,治疗才能有的放矢,提高疗效。小儿脑性瘫痪是以中枢性运动功能障碍为主要表现的综合征,可伴有视听觉、感知觉、认知等障碍,当我们理解了正常小儿运动形成的机制后,我们就会用更科学的思维方式去分析脑瘫患儿功能障碍的特点,更有针对性地制定有效的治疗方案,引导患儿尽可能接近正常地去发展他或她的神经网络和运动程序,最终学会运动技能。“运动学习”在应用时强调以下一些原则:

5.1 任务导向性训练(task-oriented training)或活动聚焦性治疗(activity-focused therapy)^[11,18]

是指根据患儿个体能力和训练目标,设计具体的任务或活动,通过引导患儿完成这些任务或进行这些活动,达到提高运动技能的目的。它适用于 PT 和 OT 治疗^[19]。因为神经网络的形成、大脑功能的重建以及运动控制的“编程”(如肌肉的选择、收缩的时序、类型、速度及强度等)均离不开具体技能的反复使用。正确的运动模式是一种高效且节能的优化模式,用这种模式指导训练所建立起来的功能就趋于正常,接近正常力学特点的运动模式具有更大的进步潜力;反之,如果患儿反复应用代偿性异常模式就会导致异常功能强化,出现误用综合征甚至继发残损,使运动功能难以提高。因此,任务导向性训练强调用具体的目标和尽可能接近正常的运动模式(符合优化的力学特点)来设计训练任务或活动。例如:从坐到站属于下肢的闭链运动,治疗时应按正常运动的要点(如双足后置,肩和膝前移超过足,然后伸髋伸膝站起)练习此技能,或采用具有相同力学特征的其他运动形式,如上下踏板或楼梯等。研究证明具有相同力学特征的运动技能间存在相互提高作用。

5.2 遵循运动技能学习过程的特点进行训练

按照运动学习的三个阶段,早期需要患儿注意力集中,避免干扰,治疗师可以提供较多的躯体引导和患儿能够理解的外源性反馈,突出动作要点,并设计出难度较低的训练项目,进行反复强化。对于有认知障碍的患儿,即使是简单的活动可能也需要较长的第一阶段。进入联系阶段,治疗师应逐渐减少躯体引导,改为口头提示或演示,鼓励患儿应用内源性反馈,逐渐提高难度,帮助患儿在不断的成功和失败中形成经验,在大脑经过整合、记忆,形成一套高效的支配程序。当患儿可以随时调出并自动支配该程序来完成动作时,学习过程便进入了自发阶段,此时,无须过多的意识支配,注意力转移到了对周围环境的判断上。在丰富的实际环境中,患儿通过主动探索使运动程序不断改良优化。所以,训练任务的设计应按照这样的特点不断调整,引导患儿从第一阶段过渡到第三阶段,最终形成技巧。反复重复和引导患儿主动探索是促进运动技能从认识期向自发期转化的重要手段。

5.3 任务或活动导向性训练与残损针对性治疗相结合

当运动功能障碍时,应从视听觉、感觉、认知、神经对运动的支配、肌肉的收缩、软组织的柔韧性、骨关节的活动范围以及心肺功能等多方面分析,有针对性地纠正各种残损(impairments)因素的影响,并着重解决主要问题,尽可能使动作接近正常的力学特点。当患儿的某些因素无法纠正,如关节活动受限,肌肉失去延展性,神经控制有限等,我们应帮助他们选择最佳方式,必要时借助药物或手术等减轻某项因素的影响,或通过借助辅助具和改建生存环境设施,使脑瘫患儿尽可能生活自理并参与社会。针对残损的康复治疗(如软组织牵缩,既可以采用被动性牵伸又可以设计成主动的牵伸)活动性训练,它是发展运动技能的基础,但必须与任务导向性训练相结合,才能真正提高运动技能,以往过多地关注了前者而忽视了后者。

5.4 个体化治疗

运动功能障碍在不同的个体之间存在着不同的原因;同一个患儿在不同时期存在着不同的问题;一个患儿身上存在的诸多残损问题间权重比例不同,需要找出主要问题;找到了主要问题,还要分析它的程度。因此,评定越细致,治疗针对性就越强,效果才会越显著。另外,训练项目应针对小儿年龄特点,具有趣味性,发挥内在驱动力。

5.5 以难易恰当的主动性运动为主

在没有出现主动运动之前,可采用神经肌肉电刺激以及各种促进技术诱发主动运动,一旦出现了主动运动就应以主动运动训练为主,且具有一定挑战性,难度以患儿稍加努力就可完成为准,并且及时调整,控制好成功与失败间的平衡,引导技能不断提高。例如训练从坐到站时,应从较高的椅子开始逐渐过渡到低椅子。主动运动对调整神经网络以形成最佳运动模式起着重要作用。

5.6 反复强化训练

训练不仅要具有功能性还要有一定量的积累,这样才能促进中枢神经系统的功能重建。强化训练方式包括:①某一个动作的集中训练;②部分与整体分解训练,即集中训练某项运动中患儿严重缺失的成分,如从坐到站中重心前移的运动成分,然后再将其融入整个从坐到站的运动中;③一种技能的多样性训练,如够取一个空杯、一个盛水的杯子、一个碗、一个苹果等;④不同技能间的交叉(或干扰)性训练,如翻身、从坐到站、行走、够物等交替进行;⑤向实际生活环境转移性训练,如在楼道行走、走进走出电梯、马路上行走、横穿马路等。第①、②种方式有助于加速技能的学习,常在运动学习早期应用;第③、④种训练有助于运动程序或纲要的形成、改良和记忆,促进神经网络的形成,常用于运动学习的第二阶段;而第⑤种方式适用于运动学习从第二阶段向第三阶段过渡。目前常用的减重步态训练、强制性使用^[20]、机器人引导训练、电脑辅助训练等新技术,都是通过仪器辅助代替人工以达到功能性强化训练的目的。另外,将训练融入生活和游戏也是增加训练量的很好方式。

5.7 注重肌力和体能训练

过去认为中枢神经系统损伤后出现痉挛,肌力训练会加重痉挛。目前研究证明:正确模式或功能性的肌力训练不仅不会加重痉挛而且可以抑制痉挛,协调肌群间的配合,对提

高运动技能是非常必要的^[21-22]。中枢神经系统损伤后肌力下降是由于下行传导冲动的减少,使下运动神经元兴奋的数目减少,激活速度减慢,运动单位同步化减弱,导致瘫痪肢体肌力下降,运动减慢,肌群间协调不良,灵活性差,再加上继发性废用,使肌肉结构和功能出现适应性改变,肌力进一步减退。因此,在治疗异常张力时应进行必要的肌力训练,这种肌力训练不等同于周围神经损伤后的肌肉力量训练,而更注重肌群间的协调控制,进行功能化的肌力训练。另外,脑瘫小儿运动时的耗氧量高于正常儿童,因此,进行有氧运动,可以降低亚极量运动时的耗氧量,减轻患儿的心肺负荷,提高运动耐力,以便适应强化训练,提高技能。

5.8 指导家长参与

对患儿家长进行教育指导是治疗中不可忽视的重要部分,家长的积极配合不仅有助于为患儿营造科学而健康的环境,还有助于增加训练量,提高疗效。

总之,“运动学习”的理念为我们提供了科学的临床思维方式。小儿的神经系统具有更大的可塑性,因此,随着脑功能研究及对正常小儿和脑瘫小儿的生物力学和行为学研究的不断深入,“运动学习”的理念在小儿脑瘫的康复治疗中将具有广阔的应用空间,更科学地指导临床治疗。

参考文献

- [1] Ketelaar M, Vermer A, Hart H, et al. Effects of a functional therapeutic program on motor abilities of children with cerebral palsy[J]. *Physical Therapy*, 2001, 8: 1534—1545.
- [2] Larin H. Motor Learning: Theories and strategies for the practitioner, In S. K. Campbell (Ed.), *physical therapy for children* [M]. 2nd edition. Philadelphia: W. B. Saunder Co, 2000.170—195.
- [3] Duff S, Quinn L. Motor learning and motor control. In D. Cech & S. Martin (Eds), *functional movement development across the life span* [M]. 2nd edition. Philadelphia: W. B. Saunder Co, 2000.86—117.
- [4] Schmidt RA. Motor control and learning: a behavioral emphasis [M]. 2nd edition. Champaign: Human Kinetics Publisher, 1988.
- [5] Schmidt RA, Wrisberg CA. Motor performance and learning[M]. Champaign: Human Kinetics Publisher, 2000.
- [6] Newell KM. Change in movement and skill: Learning, retention, and transfer, In: M. Latash, M. T. Turvey (Eds), *Dexterity and its Development*[M]. Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates, 1996.339—376.
- [7] Duff SV, Charles J. Enhancing prehension in infants and children: fostering neuromotor strategies [J]. *Physical & Occupational Therapy in Pediatrics*, 2004, 24: 129—172.
- [8] Smethust CJ, Carson RG. The effect of volition on the stability of bimanual coordination [J]. *Journal of Motor Behavior*, 2003, 35: 309—319.
- [9] Hopkins B, Ronnqvist L. Facilitating postural control: effects on the reaching behavior of 6 month-old infants [J]. *Developmental Psychobiology*, 2002, 40: 168—182.
- [10] Bartlett DJ, Palisano RJ. Physical therapists' perception of factors influencing the acquisition of motor abilities of children with cerebral palsy: implications for clinical reasoning [J]. *Physical Therapy*, 2002, 82, 237—248.
- [11] Thorpe DE, Valvano J. The effects of knowledge of results and cognitive strategies on motor skill learning by children with cerebral palsy [J]. *Pediatric Physical Therapy*, 2002, 14: 2—15.
- [12] Harbourne RT. Accuracy of movement speed and error detection skills in adolescents with cerebral palsy [J]. *Perceptual and Motor Skills*, 2001, 93: 419—431.
- [13] Huang H, Mercer V, Thorpe D. Effects of different concurrent cognitive tasks on temporal-distance gait variables in children [J]. *Pediatric Physical Therapy*, 2003, 15: 105—113.
- [14] Nudo RJ, Plautz EJ, Frost SB. Role of adaptive plasticity in recovery of function after damage to motor cortex[J]. *Muscle Nerve*, 2001, 8:1000—1019.
- [15] Coben LG. Enhancing training effects in neurorehabilitation after chronic stroke: cortical stimulation, drugs, and somatosensory input [J]. *Neurorehabilitation & Neural Repair*, 2006,20: 51.
- [16] Carmichael ST, Ohab J, Tsai P, et al. Neuronal regeneration after stroke: studies on a novel brain environment for repair[J]. *Neurorehabilitation & Neural Repair*, 2006,20: 52.
- [17] Carr JH, Shepherd RB. Stroke rehabilitation: guidelines for exercise and training to optimize motor skill [M]. Butterworth Heinemann, 2003.235.
- [18] Valvano J. Activity-focused motor interventions for children with neurological conditions [J]. *Physical & Occupational Therapy in Pediatrics*, 2004, 24: 79—107.
- [19] Heriza CB, Sweeney JK. Pediatric physical therapy: Part 1 practice, scope, scientific basis, and theoretical foundation[J]. *Infants and Young Children*, 1994, 7: 20—32.
- [20] Charles J, Lavender G, Gordon AM. Constraint induced therapy in children with hemiplegic cerebral palsy [J]. *Pediatric Physical Therapy*, 2001, 13: 68—76.
- [21] Damiano L, Able MF. Functional outcomes of strength training in spastic cerebral palsy[J]. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 1998, 79: 119—125.
- [22] Damiano L, Dodd K, Taylor NF. Should we be testing and training muscle strength in cerebral palsy [J]? *Developmental Medicine and Child Neurology*, 2002, 44: 68—72.