



儿童和青少年生长发育与肌肉力量发展评述

尹晓峰

摘要: 儿童和青少年时期是个体整个生命周期内身心发展最为关键的阶段, 肌肉力量作为反映个体健康水平的重要维度, 越来越得到人们的重视。不同国家和机构发布的公共卫生指南在鼓励儿童和青少年积极参加有氧活动的基础上, 相继提出了关于强化肌肉骨骼健康的倡议。总体而言, 肌肉力量的发展与表达始终伴随着生长和成熟, 本文旨在从生长发育视角, 对儿童和青少年肌肉力量的自然性发展进行评述, 以期为儿童和青少年人群量身定制合理的运动计划, 尤其是系统的抗阻训练方案提供参考和依据。

关键词: 儿童和青少年; 生长发育; 肌肉力量

中图分类号: G804 文献标志码: A 文章编号: 1006-1207(2023)06-0027-09

DOI: 10.12064/ssr.2023011801

A Review of Growth and Muscle Strength Development in Children and Adolescents

YIN Xiaofeng

(Shanghai Research Institute of Sports Science & Shanghai Anti-Doping Agency, Shanghai 200030, China)

Abstract: Childhood and adolescence are the most critical stages of an individual's physical and mental development throughout the life cycle. muscle strength is increasingly valued as an important dimension that reflects an individual's health level. Public health guidelines issued by different countries and institutions have successively proposed initiatives to strengthen musculoskeletal health, based on encouraging children and adolescents to participate actively in aerobic activities. In general, the development and expression of muscle strength always accompanies growth and maturity. This paper aims to review the natural development of muscle strength in children and adolescents from the perspective of growth and development. It also provides reference and basis for tailoring reasonable exercise plans for children and adolescents, especially systematic resistance training programs

Keywords: children and adolescents; growth and development; muscle strength

青少年时期是个体整个生命周期内身心发展最为关键的阶段。无论年龄、发育成熟度以及性别如何, 积极而充分的身体活动对于维持和/或促进健康至关重要。遗憾的是, 自 2010 年世界卫生组织就青少年、成年人和老年人获得最佳健康收益的身体活动类型和频率提出建议以来, 各国适龄儿童和青少年的身体活动变化趋势却不乐观。2018 年世界卫生组织开展的一项涉及全球 146 个国家和地区的 298 所学校 1 600 万名 11~17 岁适龄学生体力活动不足趋势的调查显示, 81% 的青少年未能达到“每日 60 分钟中高强度体力活动”的全球建议, 中国同龄青少年中有 80.1% 的男孩和 88.6% 的女孩每日体力活动量低于理想水平。不仅如此, 伴随全球范围内青少年体力活动不足同时发生的还有肌肉健康指标(即肌肉力量、肌肉爆发力和局部肌肉耐力)的不断下降^[1]。一项针对 16 个国家的青少年过去近四十年

的场地力量测试结果的分析表明, 中国、美国、澳大利亚、加拿大、捷克、荷兰、立陶宛、西班牙和瑞典的青少年在立定跳远、握力、仰卧起坐、屈臂悬垂等测试中都呈现了不同程度的逐年下降趋势^[2]。研究人员将这种非病变引起的肌肉力量、爆发力减少和运动功能不足的症状引入了一个特定术语“儿童肌力减少症”(pediatric dynapenia), 用于表征异常低水平的肌肉力量。从公共卫生的角度来看, 力量储备低(即肌肉力量低于平均水平)的儿童和青少年在日常生活或从事运动锻炼时将很难应对非预期的压力源, 纵向数据显示这种力量差异可能会随着发育时间的推移在成年后进一步扩大。

针对此类因身体运动不足而引发的功能障碍, 一些学者基于大脑介导的运动控制理论, 建议利用生命早期阶段神经肌肉系统的“可塑性”来提升肌肉力量表达, 实现神经元髓鞘化和大脑神经通路的“激

收稿日期: 2023-01-18

基金项目: 上海市科委“科技创新行动计划”社会发展科技攻关项目(22dz1205100)。

作者简介: 尹晓峰, 男, 博士, 副研究员, 硕士生导师。主要研究方向: 青少年选育才。E-mail: 13564416996@139.com。

作者单位: 上海体育科学研究所(上海市反兴奋剂中心), 上海 200030。



活”,包括突触修剪(通过减少神经元和突触的总数来改变神经结构,使突触更加有效),从而最大限度地

动的结果至关重要。与成年人不同,青少年的肌肉力量发展与年龄、生长和成熟状态的复杂交互作用相关,并因性别而异,同时受到遗传、环境、肌肉活动等

1 生长发育与自然性力量的表达

收缩肌肉力量可以理解为一块肌肉或一组肌肉在特定速度下产生的最大力量或最大张力^[3],肌肉力量代表了个体为抵抗外部阻力而生成力的能力。在大部分的运动场景中,都需要在对抗各种外部阻力(如自身体重、器械的质量或是对手的身体质量)的同时,产生较大加速度以达成运动任务或目标。根据牛顿第二运动定律(力 = 质量×加速度),对抗外部阻力时的加速度由作用力的大小决定^[4]。这清楚地表明,个体自主产生最大力量或扭矩的能力对运

对生长和成熟阶段儿童肌肉发育的评估,有助于人们了解力量表达在年龄和性别方面的差异。尽管神经肌肉激活受遗传因素影响的具体程度尚不明确,但肌肉质量遗传率的估计值一直很高,范围为60%~90%。相比之下,影响肌肉功能的肌纤维成分因素受遗传影响的比例大约为45%,剩余的部分则由决定I型和II型肌纤维比例的后天运动因素所决定,包括运动的类型、强度和持续时间等^[5]。因此,在引入抗阻训练之前,先了解生长发育进程中可能影响儿童和青少年力量自然发展的发育因素(图1)。

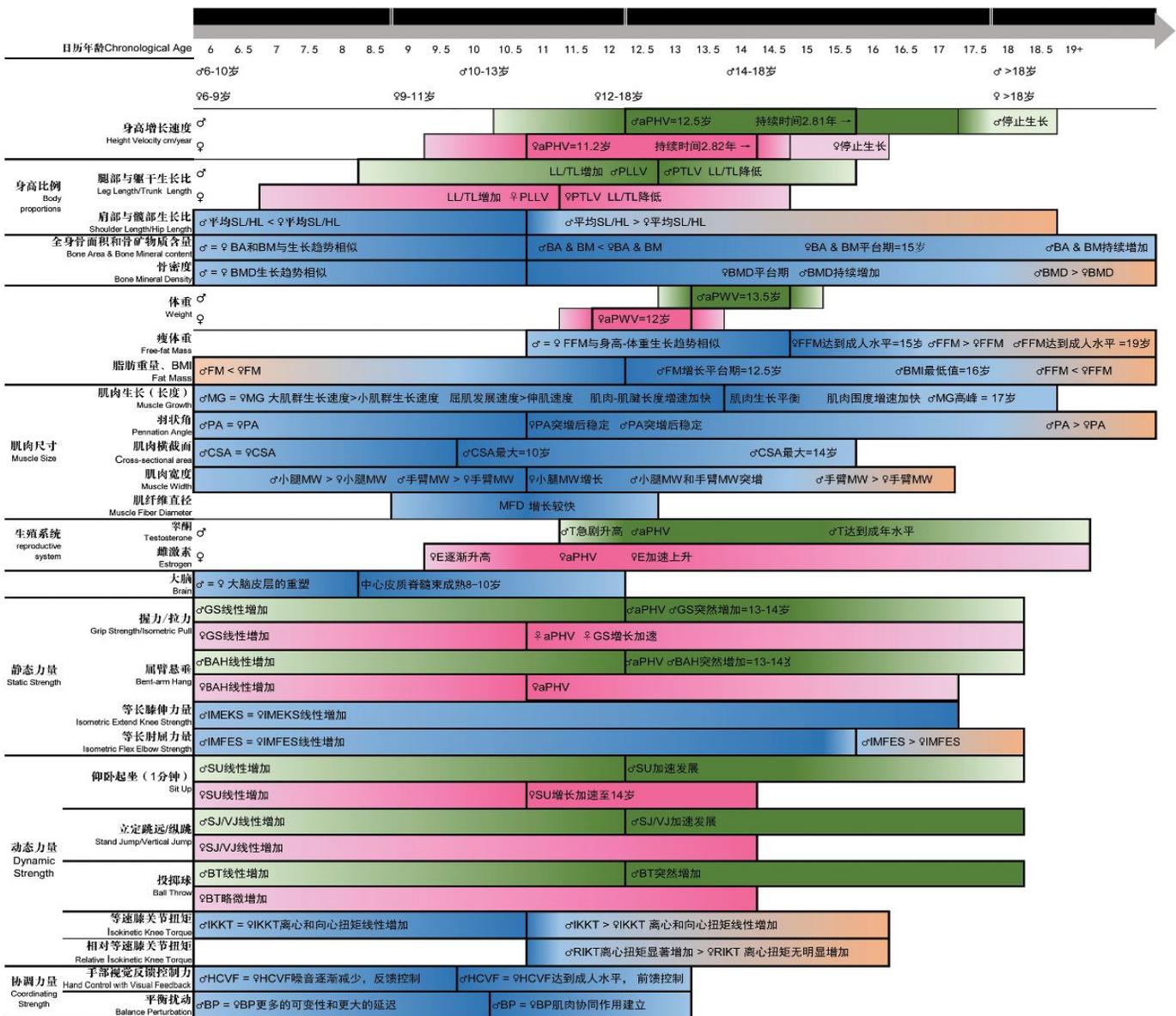


图1 儿童和青少年生长进程中的发育因素

Figure1 Developmental factors in the growth of children and adolescents



1.1 影响力量发展的生长与成熟因素

每个孩子都是“独一无二”的个体,没有任何两个孩子的身体形态或是身体成分会按照完全一模一样的速度发展,即使是自身的各个部位之间也不会同步生长。然而,在生长发育的过程中,又都经历着相同的成熟变化规律。无论生长速度如何,孩子们发展的阶段却呈现出明显的共性化特征,最终都会达到完全成熟的状态。就如同花瓣形状各异,花期各不相同,但是它们都会在萌芽期破土而出,花芽期含苞

待放,最终在初花期向阳盛开。对于发育阶段孩子而言,描述和理解他们在儿童期和青春期的身高、骨骼长度和体重变化十分重要。无论是身高还是体重,测量时都会表现出昼夜变化的差异。早上的时候会更高、更轻,而在当天晚些时候则更矮、更重。身高主要受重力影响,体重受饮食、体力活动或月经周期影响。因此,在追踪孩子的身高和体重时,应当尽量保证在相同的条件下进行。全维度生长发育因素与力量自然发展趋势见图2。

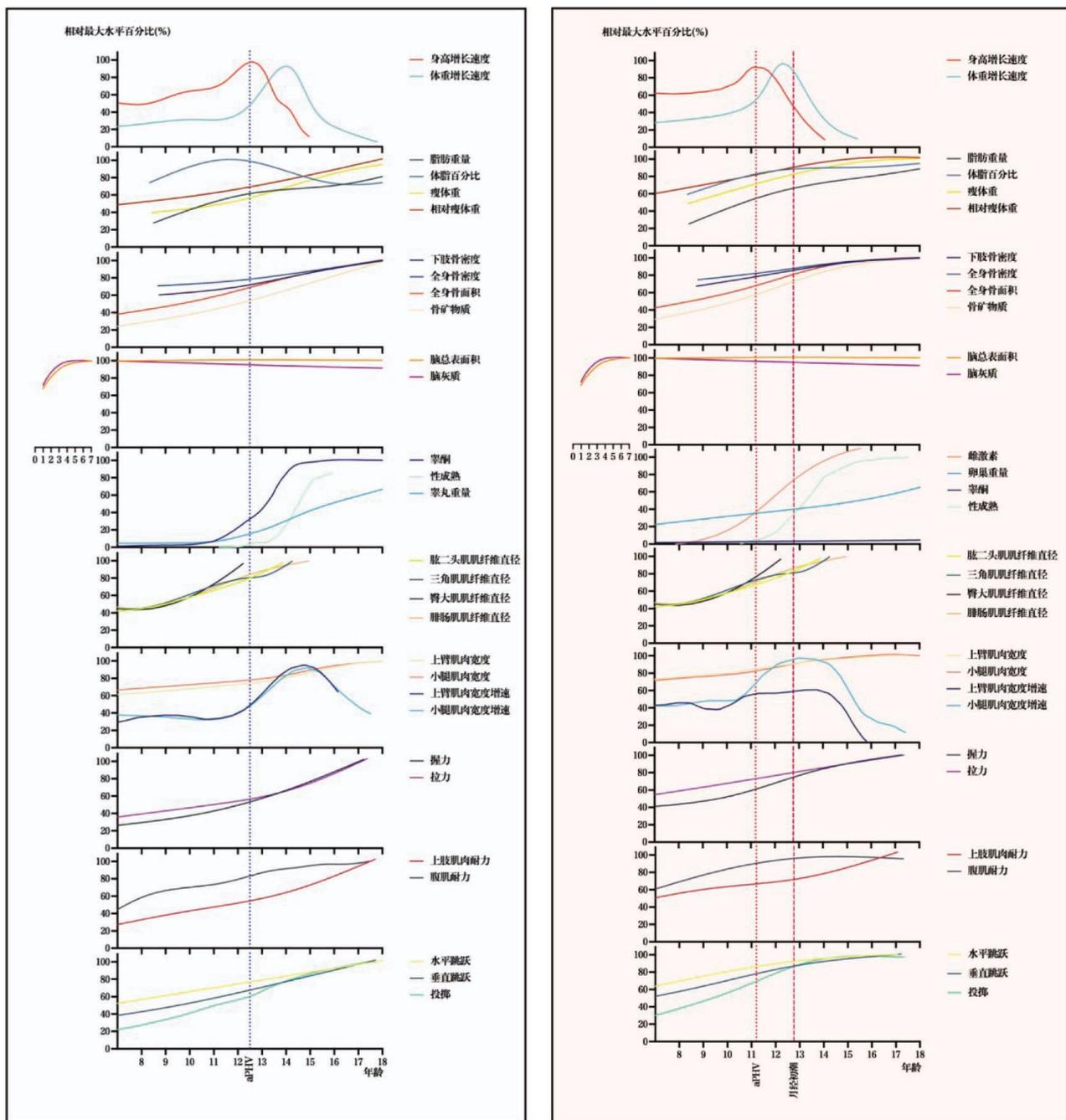


图2 全维度生长发育因素与力量自然发展趋势(左为男孩,右为女孩)

Figure2 Full-dimensional growth and development factors and natural development trend of strength (left is boys, right is girls)



1.1.1 身高随年龄的变化

在婴儿期和儿童期,孩子在不断长高,但生长速度(即每年身高增加的高度)逐渐减慢。为了计算生长速度,通常每6个月测量1次身高和体重,在整个青春期则需要增加测量的频次(每3个月记录1次)。当将身高增幅百分比与年龄作图时,大多数孩子在青春期的某个时间节点上会出现身高的大幅增加。身高最大增长速度对应的年龄称为aPHV,上海女孩平均aPHV为11.2岁(范围为9.5~14.5岁),男孩大约为12.5岁(范围为10.5~17.5岁),最大身高年增长速度约为8.5 cm/年[数据来源于上海体育科学研究所(上海市反兴奋剂中心)选材育才研究中心内部数据,研究尚未发表]。一般而言,男孩的典型生长突增持续时间为2.81年,女孩为2.82年,在此期间平均身高增长分别为(21.1±3.9)cm和(19.6±4.7)cm^[6]。女性通常大约在16岁时停止长高,男性则会继续生长2~3年左右。由于男孩在青春期不仅具有较长的增长期,同时还具有稍快的身高突增速度,因此导致了成年后身高上的性别差异。

需要注意的是,儿童在向成年过渡过程中面临的独特挑战之一是身体各部分的不同增长速度,而这些差异对于运动策略中力量的施加造成了较大的影响。男孩和女孩的腿与躯干长度的增长模式相似,男孩和女孩腿部长度在aPHV之前的4年开始增加,腿部峰值生长速度在aPHV之前或与之同时发生,躯干的峰值生长速度则在aPHV之后达到,因此腿部长度的增加往往先于躯干长度的增长,腿长与躯干长度(即坐高)的比率呈现出先增后减的趋势。

肩部和臀部骨骼宽度在其发育过程中表现出明显的性别差异。在青春期生长突增开始之前,女孩(平均而言)的平均肩/臀宽高于男孩。在身高突增之初,该比例在女孩中显著下降,而在男孩中增加,导致在aPHV年龄和之后的显著性别差异^[7]。这反映了女性骨盆宽度相对于肩部的更大发展,以及男性肩部宽度相对于骨盆的更大发展。

1.1.2 骨骼随年龄的变化

全身骨面积和骨矿物质含量随年龄呈线性增长的趋势相似,儿童期没有性别差异。在青春期早期,女孩的骨矿物质含量平均略高于男孩,在15~16岁左右全身骨面积和骨矿物质含量将达到平台期。而男孩的骨矿物质含量则会一直持续增加直至成年期(图2)。

骨密度的性别差异相对较小,男孩和女孩青春期生长加速时间是影响骨密度变化的主要因素之一。女孩在aPHV前后骨密度增长速度变化不明显,在月经初潮后骨密度增长放缓并逐渐达到平台。男

孩骨密度在aPHV后增长加速,并在青春期后期(18岁左右)男孩骨密度超过女孩,这种发育特征变化导致骨密度的性别差异在青春期后期体现出来并持续到成年期(图2)。

1.1.3 体重随年龄的变化

体重代表了必须由下肢肌肉群支撑的负荷,因此为肌肉生长提供了必要的刺激。体重随年龄变化的生长曲线显示出与身高-年龄曲线相似的模式(图2)。首先是在婴儿期出现体重的快速增长,随后是儿童期的稳定增长,然后是青春期出现的第二次快速增长,最后是成年期的缓慢增长。在青春期生长突增开始期间,体重随之迅速增加,通常体重的峰值速度大约发生在aPHV之后的1年。此时,也大致对应力量自然增长峰值的年龄。这表明体重的增长一定程度上反映了肌肉尺寸增长以及神经肌肉的适应和协调^[8]。

瘦体重、脂肪重量与体脂百分比由体内总水分与体密度计算得到。瘦体重的增长模式与身高体重的变化趋势类似,其生长加速期存在明显的性别差异:女孩瘦体重大约在15~16岁达到成人水平,而男性大概在19~20岁达到成人水平。青春期晚期和成年早期,男孩瘦体重增长值约是女性的1.5倍,该差异说明了男孩的肌肉组织迅速增长。

脂肪重量在儿童生长过程中起着重要作用。估计的脂肪重量从出生时的约15%增加到1岁时的约30%,并一直保持稳定直至6岁左右,这个过程几乎不存在性别差异。之后女孩的脂肪含量比男孩增长的幅度更快,体脂百分比也随之升高,且整个青春期的女孩都在保持着这种趋势。对于男孩来说,脂肪重量的增加在青春期生长突增时达到平台期,体脂百分比在aPHV前达到峰值,随后不断下降,大约在16~17岁达到最低值。进入到青春期后期和成年期,女孩脂肪重量平均是男孩的1.5倍。关键的性别差异在于,男孩在青春期体重增加主要归因于肌肉和骨骼质量的增加,而脂肪量的变化相对较小。对于女孩来说,脂肪量持续增加,骨骼和肌肉量的增幅降低。

1.1.4 肌肉随年龄的变化

在正常的生长发育过程中,肌肉横截面积的增加通常被认为是由于肌纤维尺寸增加或肥大而不是细胞增生所致。随着骨骼长度和身体比例的增长以及形态的变化,肌肉系统也必须随之发展。肌肉必须在长度(以使骨骼生长和肌腱起点和止点的分离引起的张力正常化)以及体积、宽度/横截面上增长,以提升支撑和移动更大、更重骨骼的力量。尽管不断变化的激素环境(例如生长激素、胰岛素和睾酮)刺激肌肉长度和大



小的增长,但局部机械因素也有助于肌肉适应^[9]。

肌肉组织在儿童时期与青春期初期的发展存在不平衡现象,首先是较大肌肉开始发育,生长速度快于小肌群,屈肌发展速度快于伸肌,这一发展特点直到青春期中期才逐渐平衡。这种不平衡的发育特点可能会导致青春期阶段的技术动作不协调等现象。男孩在青春发育后期 17~18 岁时肌肉组织生长达到高峰。

由于骨骼在 aPHV 的快速增长,肌肉也以增加长度为主,但是落后于骨骼的生长速度,肌力相对薄弱。骨骼生长改变了肌肉附着点的分离距离,并且由于在肌腱连接处连续添加了新的肌节,肌肉纤维的长度增加^[10]。这种适应在功能上很重要,因为它确保对于给定的肢体运动范围,肌肉将在长度-张力曲线的最佳长度或区域内工作。由于骨骼生长为肌肉长度增长施加了必要的局部刺激,因此在骨骼长度增长和随后的肌肉长度增长速度之间可能存在滞后或非同步性。这得到了生长过程中组织预负荷增加的概念的支持,该概念可以定义为组织在放松状态下所承受的力^[11]。

除了骨骼和肌肉-肌腱长度之间的生长滞后外,还存在肌肉长度增长与肌肉横截面增长之间的延迟^[12]。当身高增长速度减慢,性激素分泌增多时(aPHV 之后,男孩约 15 岁以后,女孩约 13 岁以后),绝对力量出现显著的自然性增长,但是通常落后于 aPHV (图 2)。骨骼(杠杆)长度和体重增加的同时,肌肉尺寸的滞后增加也会导致肌肉的超负荷,并且需要改变神经肌肉协调性以保持平衡。通常用肌肉的生理横截面积(Physiological Cross Sectional Area, PCSA)表示肌肉尺寸,PCSA 中肌纤维排列的羽状角反映了肌肉产生力的能力。研究表明,羽状角从出生后开始单调增加,并在青春期生长突增后达到稳定值,成年后性别差异明显^[13]。肌肉纤维横截面在儿童时期没有差异,直到女孩大约 10 岁和男孩大约 14 岁时达到最大或类似成人的大小,但是肢体长度仍然有相当大的增长空间^[14]。反映肌纤维尺寸的另一个常用指标是肌纤维的直径,婴儿出生后肌纤维的直径随着年龄和体型的增加而迅速增加,但不同部位肌纤维直径存在较大的差异,一项涉及男女混杂数据的研究显示,9~12 岁肌纤维直径增长较快,随后肌纤维直径增速放缓,并逐渐趋于稳定。

标准四肢 X 光片可以观察局部肌肉组织的生长发育情况,在 aPHV 前,男女肌肉宽度差异并不明显,总体来说男孩肌肉宽度略大于女孩。青春期前男孩和女孩手臂和小腿肌肉宽度的生长速度相似,在 aPHV 后男孩手臂和小腿肌肉宽度都表现出明显的生长突增,女性上臂肌肉宽度未见明显生长突增,小

腿肌肉宽度增长速度在 aPHV 后出现增长,随后出现了持续 4~5 年的平稳期。青春期男孩的上臂肌肉宽度增长速度约是女性的 2 倍,小腿肌肉宽度增长速度的性别差异不明显。

1.1.5 生殖系统随年龄的变化

生殖系统的发育极大地影响着孩子的全面发育和生长。睾丸和卵巢分别是男孩和女孩重要的性腺。睾丸的重量在生命早期略有增加,然后显示出很小的变化,直到青春期(11 岁左右)重量急剧增加,直到生殖达到成年值(约 20 岁)。卵巢在整个生长发育阶段呈现平缓但持续的增加,青春期的重量增加不像睾丸那么剧烈。

男性睾酮主要由睾丸合成。女性雌激素主要由卵巢产生,少量来源于肾上腺皮质分泌的前体外周转化,女性睾酮主要(约 75%)来自肾上腺来源的雄烯二酮的酶促转化,其余的(约 25%)由卵巢产生。睾酮和雌激素的生物合成、酶转化、血液中的运输以及生产组织和目标组织的代谢清除是复杂的生物过程,对生长和成熟的调节有相当大的影响,对男女第二性征成熟起重要作用。睾酮与运动能力关系密切,能够促进蛋白质合成、增加肌肉含量。男性睾酮于 aPHV 前一年开始迅速升高,并在 aPHV 之后的 3 年左右达到成年水平。女性睾酮在青春期前和男性无显著差别,后随年龄增长出现少量增长,但总体维持在较低水平。女性雌激素在 aPHV 前两年开始逐渐上升,然后随着性成熟的开始加速上升。生殖成熟时间的性别差异清楚地反映在女孩的雌激素上升和男孩的睾酮上升的时间上。

1.1.6 神经系统随年龄的变化

如果把肌肉和骨骼系统的生长看作人体“硬件”结构的搭建,那么神经系统的成熟以及与肌肉系统的整合则是关于“软件”程序对硬件运转的支配和调控。无论是单关节最大力量的生成还是多关节涉及的力量表达,负责大脑信息传出的中枢神经系统和感觉信息传入的外周神经系统发育一直都在个体生长发育的过程中进行着对肌肉收缩运动的控制。

神经系统发育较早,大脑在 6 岁前脑重就接近成年的 90%(图 2)。在婴儿期和儿童早期,大脑的生长非常迅速,“大脑生长高峰”大约从怀孕中期开始,一直持续到 4 岁左右。从怀孕中期到 18 个月左右,这段高峰期的早期特点是胶质细胞的快速繁殖;后期持续到 4 岁左右,特点是髓鞘化。胶质细胞基本上是初级神经细胞,即神经元的支持细胞,在怀孕期间相当早地发育。髓鞘是一种覆盖神经细胞轴突的脂肪鞘。在髓鞘



化过程中,髓鞘在现有轴突周围逐渐增厚,并随着轴突长度的增长在轴突的新部位周围沉积成鞘。髓鞘与神经冲动的传递有关,厚度越大,冲动的传递就越快。

婴儿期和儿童早期的运动发展与此时大脑和中枢神经系统的快速生长有关。这种快速生长很大程度上反映了神经肌肉的成熟。环境条件也很重要,并与这些生物过程相互作用,影响运动发育的表现,所以在早期运动发育中把生物与环境的影响分割开来几乎是不可能的。

大脑的每个半球和叶以及每个叶内的每个区域都有自己的发展速度。在 15~24 个月时,几乎所有的大脑区域都达到了类似的成熟水平。第二次发生在 6~8 岁,涉及大脑皮层的重塑(厚度和神经元密度的变化),导致树突模式的改变和神经元密度的增加。基于大脑磁共振成像的数据也表明,代表大脑的高级传出中心皮质脊髓束的发育随着年龄的增长而发展,这些通路在 8~10 岁达到成熟,并可能延长至 10~12 岁^[15-16]。

1.2 生长发育进程中的力量表达

20 世纪 30 年代末, Hill^[16] 开创性提出的肌肉收缩模型,解释了肌肉中的被动组件与主动组件协同工作,以实现人体的力量表达。进入 20 世纪到 70 年代后,一些学者开始针对人体力量表达的不同类型进行分类研究,包括下肢腿部的跳跃模式和大负重下的最大力量、高速力量、反应性力量表达^[17-19]。与此同时,儿童与成年人群之间的力量表达也开始进入研究人员的视野, Asai 等^[20] 比较了两个人群肌肉静态和动态收缩下的力量表达差异。正如前文所述,生长发育涉及的众多因素相互作用,会对儿童和青少年时期的力量发展产生影响。然而,想要客观反映与年龄和性别相关的自然力量变化以及人体测量学、激素、肌肉、神经等因素在纵向时间上的贡献率仍然是一项重要的挑战。本文在考虑肌肉等长、等动和等张收缩特征的同时,以科学文献和应用实践为经验依据,将 James 等^[21] 提出的力量素质分类框架做出了进一步简化,按照肢体运动过程中的肌肉产生自主收缩的能力,从最大静态力量、最大动态力量以及次最大协调力量三类,进一步观察生长发育过程中儿童和青少年的力量发展。

男孩和女孩的力量似乎都在增加,直到大约 14 岁,女孩的力量开始达到稳定水平,男孩的爆发力很明显。到 18 岁时,男孩和女孩的力量几乎没有重叠,而男性的力量生产通常更大。性别差异变得明显的确切年龄尚不清楚,任何性别差异的程度都因肌肉群和肌肉动作而异^[13]。例如,从年幼时期开始,男女躯

干和上肢的力量差异就比下肢大得多^[22]。有人提出,男性上肢力量可能几乎是女性的两倍^[23]。根据所检查的肌肉群,力量性别差异的不同幅度可能反映了肾上腺和性类固醇的影响、长骨的生长、体重和地面反作用力^[24]。虽然可以总结男孩和女孩力量随年龄变化的一般模式,但对力量的年龄和性别差异的描述必须在“力量”定义的背景下进行解释。这将影响导致观察到的任何差异的因素。

在整个儿童期,力量的性别差异很小。在男性青春期的生长高峰期,力量发展明显加速,放大了性别差异。随着青春期年龄的增长,女孩在力量测试中的表现等于或超过男孩的百分比大大下降。16 岁以后,很少有女孩的表现和男孩的平均力量一样高,反之,很少有男孩的表现和女孩的平均力量一样低。

1.2.1 最大静态力量随年龄变化

静态力量是肌肉在对抗外力和/或自身重量时,肌肉长度保持不变且关节处没有发生运动的情况下施加力的能力。手部握力和上肢等长拉力是大多数静态力量测试常用的测试任务。一项来自 6~11 岁的混合纵向样本和 11~18 岁的纵向样本的研究数据显示,男孩的力量随着年龄的增长呈线性增长,直到 13~14 岁(aPHV 后)力量发展加速,即青春期的力量突增。女孩力量随着年龄的增长呈线性增长,在 aPHV 时存在力量增长加速的情况,但没有表现出像男孩那样的突然增加。在上肢肌肉耐力的曲臂悬垂测试任务中,男孩的肌肉耐力呈现出了与手部握力相似的发展趋势。女孩的肌肉耐力也随着年龄的增长持续增加到 16~17 岁,但同样未出现类似男孩的突增情况。虽然此类追踪研究一般在 18 岁时停止,但静态力量特别是男性力量的增长可能至少会持续到 30 岁左右。

在实验室中对儿童静态力量进行研究时,普遍选择最大自主收缩情况下产生最大力作为测量指标,它通常反映了对肌肉的神经驱动水平,包括运动单位募集的比例和放电频率的程度。由插入颤搐技术(Interpolated Twitch Technique, ITT)诱导的最大激发力与自主肌肉激活产生的最大收缩力之间的力量赤字在儿童和成人之间存在显著差异,儿童对运动单位的募集和利用能力远低于成人,进入到青春期这种差异将会逐渐减小^[25-26]。总体而言,从儿童早期到男孩青春期开始(大约 13 岁)和女孩青春期结束(大约 15 岁),男孩和女孩的力量都以相当线性的方式增加。在进入青春期后,男孩力量的突增加剧了性别差异,女孩的力量在青春期似乎以与青春期前阶段相似的速度增加,然后在青春期之后阶段似乎趋于稳定。进一步从身体部位来看,在整个童年和青春期,



特别是在男孩中,等长肘屈肌和膝伸肌力量与实际年龄呈高度正相关。与下半身相比,儿童上肢肌肉的力量性别差异相对较大。Gilliam等^[27]报道了15~17岁青少年的膝关节伸展峰值扭矩没有显著的性别差异,但肘伸肌的性别差异很明显。该发现得到了一项针对9~18岁青少年排球运动员的研究支持,研究人员没有在膝关节等长伸展力量上发现显著的性别差异,但青春期之后阶段肘屈肌力量的性别差异显著^[13]。上肢与下肢最大自主收缩的性别差异,提示应当关注儿童和青少年上下肢运动的均衡性,尤其是关注男孩和女孩上肢力量的发展。

1.2.2 最大动态力量随年龄的变化

与静态力量的表达方式相反,动态力量是肌肉在对抗外力和/或自身重量时,肌肉长度发生变化且关节产生运动时施加力的能力,其表达形式也较为多样,包括单关节和多关节特定速度下(等速、高速、慢速)离心与向心力量的生成表现。

1 min内完成的仰卧起坐的数量是衡量腹部动态力量的场地测试项目,它也经常被纳入健康相关的体能评价当中。男孩的腹部力量在aPHV前随着年龄的增长呈线性增长,aPHV之后则呈现出一定程度的加速发展。女孩的腹部力量也随着年龄的增长而提高,到14岁左右,在月经初潮后处于平台期。儿童时期腹部力量耐力的性别差异可以忽略不计,但是在青春期逐渐出现较明显的性别差异^[28]。

在跳跃测试中,女孩14岁和男孩18岁之前立定跳远成绩都会随着年龄的增长而呈现直线上升。女孩在14岁以后,立定跳远的成绩仅出现了略微提升,且与男孩跳跃表现差异逐渐变大。垂直纵跳的年龄趋势和性别差异与立定跳远相似。然而,立定跳远的增长斜率更陡峭,表明男性在青春期显著加速^[28]。

手持球投掷的距离是衡量上半身协调和动态肌肉力量的指标。男孩的投掷表现随着年龄的增长而明显呈线性增加,在aPHV左右斜率变得更加陡峭,说明出现了青春期的增长速度突增。女孩的投掷成绩只在6~14岁之间略有提高,然后趋于稳定。儿童期投掷成绩的性别差异比其他基本技能的差异要大,在青春期后差异更加明显^[28]。

等速评估技术是在关节运动的所有阶段以恒定的速度施加最大力量,因此与1RM相比,等速模式对儿童和青少年而言更加安全^[29]。不仅如此,等速测试还可以评估肌群的力-速特征,因此也获得了研究人员的青睐。在回顾近年来等速动态力量变化的横断面研究后发现,动态力量随着年龄增长而显著增加。如从9~21岁,男性和女性的膝关节绝对伸肌

(314%和143%)和屈肌(285%和131%)的力量都有所增加^[30]。另一项针对最大自主伸膝扭矩的等速测试中,加入了表面电极记录了股四头肌的激活情况。扭矩在11~16岁时随着年龄的增长而明显增加。性别差异在11岁时很小,但在16岁时,向心(肌肉缩短)和离心(肌肉延长)运动的性别差异都有增加。从11岁到16岁,男孩的扭矩相对增加特别大,在男孩和女孩的向心扭矩测试中分别为71%到94%,52%到53%;在男孩和女孩的离心测试中分别为87%到100%,56%到59%。然而,当把体重作为协同因素进行标准化考虑后,11~16岁的男孩在离心扭矩方面存在显著增长,而女孩并无显著增长。这些趋势表明,在青春期,男孩的伸膝肌的离心和向心力产生能力有不同的变化,但女孩并不明显。每单位肌电活动的离心扭矩与向心扭矩比是衡量神经肌肉连接效率的指标,在11~16岁之间不随年龄变化,在男孩和女孩之间也没有差异^[31]。

1.2.3 次最大协调力量随年龄的变化

协调力量涉及在执行单关节或多关节运动任务期间,协调次最大力量输出,以控制任务的精度或执行目标动作时合理支配身体节段的能力。通过检查儿童以恒定的力量水平执行任务的能力,可以获得儿童单关节协调力量表现的重要信息。与年龄较大的儿童和成人相比,儿童在协调力量恒定输出时会表现出更大的波动性,或称之为感觉运动系统具有较大的“噪音量”,此时施加的力量会在高于和低于预期水平的范围大幅振荡。随着年龄的增长,儿童运动表现出的力量可变性程度将趋于平稳,这种较低的噪音是获得更好运动表现的先决条件^[32]。当采用视觉反馈进行协调力量变异性调查时发现,3~4岁儿童握力匹配视觉目标的能力较低(力的跟踪能力),而在4~5岁时观察到儿童外部引导下的运动控制出现改善。进一步的提升发生在6岁之后,并且在10岁时几乎达到成年水平^[33]。然而,当视线被遮挡时,不同年龄段的协调力量变异性却没有差异。这表明儿童使用视觉反馈来控制手部力量输出的能力逐渐提高^[32]。通过使用功率谱分析执行力任务时检查力的振荡,还获得了更多信息。随着孩子的成长(尤其是10岁以后),较高频段(20~30 Hz)的功率会增加,而较低频段(<10 Hz)的功率会下降。这表明控制力的策略从基于反馈的控制逐渐变为前馈控制^[33]。似乎随着年龄的增长,力量表现的提高很大程度上是由于增强了感觉运动系统输出以满足任务需求的能力。

多关节肌肉协同作用的形成是动作发展和姿态控制的关键步骤,因为这种协同作用是执行功能性



运动技能(如伸手、坐姿、站立和行走)的先决条件。此外,这些基本技能将成为日后获得更复杂、更有目的的行动的基础。在多关节任务中,肢体内的连接节段之间存在非肌肉的、被动的相互作用力。节段之间的力量构成了下肢能量传递的基本来源,并且是移动期间远端节段速度大幅增加的原因^[34]。神经系统还利用节段之间自然产生的力量来简化肢体抬高越过障碍物的控制,并将运动过程中的能量消耗降至最低。因此,肌肉力量总是根据系统的被动反应而受到调节,以抵消或补充由连接节段运动产生的运动相关力^[35]。

儿童骨骼肌肉特征的发育进程较为缓慢,导致多关节任务中存在的被动交互力量利用不足,这可能是发展适当的多肌肉协同来控制多关节动作的限制因素。与此同时,肌肉骨骼系统之间的异步生长也被证明会影响神经肌肉控制。为了保持身体控制的稳定性,身体的质心必须保持/控制在底部支撑面。然而,许多有助于动态和静态稳定性的系统(体感和前庭感觉、产生运动以保持对齐的运动系统,以及必须移动/稳定骨骼和关节骨骼框架)在青春期发生明显变化。青春期被认为是姿势控制发展的“转折点”,从儿童时期固定身体各节段位置和运动的“整体”策略来简化运动方案,发展到身体各部分独立精确控制的节段式策略^[36]。

从平衡扰动中恢复所需的踝关节和髋关节发展适当力矩水平的能力也随着年龄的变化而变化。与2~3岁和7~10岁儿童相比,4~6岁儿童肌肉反应表现出更多的可变性和更大的延迟^[37]。这种姿势能力的暂时退化是由于在这个特定的年龄,儿童开始扩展姿势技能,包括感觉整合。到7~10岁时,肌肉对支撑面平衡扰动的反应协同作用与成年人基本相同,而对视觉或本体感受引起的平衡扰动做出短时、快速而更加稳定的肌肉协同作用至少要在10岁之后^[38]。

2 小结

生长发育和成熟是贯穿孩子生命周期早期阶段极其重要的特征。尽管对影响力量发展里程碑的各类因素进行了逐一介绍,但是它们之间的交互作用却不能也无法完全分开。体育教师、教练员以及家长需要了解不同年龄和性别的青少年在执行运动任务过程中使用的相应策略,从中所获得肌肉、神经以及激素等方面的适应。这些信息将有助于为所有成熟阶段的儿童量身定制运动计划提供参考和依据,包括系统的抗阻训练。儿童和青少年要以流畅、优雅和精准的方式执行运动,就需要持续获得所有增强肌肉健康和运动技能表现的机会,以实现在童年时期

发展起来的觉察、认知、情绪、感知和动作控制子系统的协调整合。

参考文献:

- [1] GUTHOLD R, STEVENS G A, RILEY L M, et al. Global trends in insufficient physical activity among adolescents: A pooled analysis of 298 population-based surveys with 1.6 million participants[J]. *The Lancet Child & Adolescent Health*, 2020, 4(1):23-35.
- [2] FAIGENBAUM A D, REBULLIDO T R, PEÑA J, et al. Resistance exercise for the prevention and treatment of pediatric dynapenia [J]. *Journal of Science in Sport and Exercise*, 2019, 1(3):208-216.
- [3] KNUTTGEN H G, KRAEMER W J. Terminology and measurement[J]. *Journal of Applied Sport Science Research*, 1987, 1(1):1-10.
- [4] 徐龙道.物理学词典[M].北京:科学出版社,2004.
- [5] SIMONEAU J A, BOUCHARD C. Genetic determinism of fiber type proportion in human skeletal muscle [J]. *The FASEB Journal*, 1995, 9(11):1091-1095.
- [6] FAUST M S. Somatic development of adolescent girls [J]. *Monographs of the Society for Research in Child Development*, 1977:1-90.
- [7] PATEL D R. Paediatric exercise science and medicine [J]. *JAMA*, 2010, 303(22):2298-2302.
- [8] MACINTOSH B R, GARDINER P F, MCCOMAS A J. Skeletal muscle: Form and function[M]. Champaign: Human Kinetics, 2006.
- [9] SINCLAIR D. Human growth after birth [M]. London: Oxford University Press, 1973.
- [10] HAWKINS D, METHENY J. Overuse injuries in youth sports: Biomechanical considerations[J]. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 2001, 33(10):1701-1707.
- [11] XU L, NICHOLSON P, WANG Q, et al. Bone and muscle development during puberty in girls: A seven-year longitudinal study[J]. *Journal of Bone and Mineral Research*, 2009, 24(10):1693-1698.
- [12] BINZONI T, BIANCHI S, HANQUINET S, et al. Human gastrocnemius medialis pennation angle as a function of age: From newborn to the elderly[J]. *Journal of Physiological Anthropology and Applied Human Science*, 2001, 20(5):293-298.
- [13] CROIX M D S. Advances in paediatric strength assessment: Changing our perspective on strength development [J]. *Journal of Sports Science & Medicine*, 2007, 6(3):292.
- [14] MÜLLER K, HÖMBERG V. Development of speed of repetitive movements in children is determined by struc-



- tural changes in corticospinal efferents[J]. *Neuroscience Letters*, 1992, 144(1-2):57-60.
- [15] CARAMIA M, DESIATO M, CICINELLI P, et al. Latency jump of “relaxed” versus “contracted” motor evoked potentials as a marker of cortico-spinal maturation [J]. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology/ Evoked Potentials Section*, 1993, 89(1):61-66.
- [16] HILL A V J P O T R S O L S B-B S. The heat of shortening and the dynamic constants of muscle [J]. *Proc. of Royal Society of London, Series B*, 1938, 126(843):136-195.
- [17] SCHMIDTBLEICHER D, KOMI P J S, SPORT P I. Strength and power in sport [J]. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 1994, 26(11):1422.
- [18] VIITASALO J, BOSCO C J E J O A P, PHYSIOLOGY O. Electromechanical behaviour of human muscles in vertical jumps[J]. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 1982, 48:253-261.
- [19] NEWTON R U, DUGAN E J S, JOURNAL C. Application of strength diagnosis[J]. *Strength & Conditioning Journal*, 2002, 24(5):50-59.
- [20] ASAI H, AOKI J I J O S M. Force development of dynamic and static contractions in children and adults [J]. *International Journal of Sports Medicine*, 1996, 17(3):170-174.
- [21] JAMES L P, TALPEY S W, YOUNG W B, et al. Strength classification and diagnosis: Not all strength is created equal[J]. *Strength and Conditioning Journal*, 2023, 45(3): 333-341.
- [22] BEUNEN G, MALINA R M J E, REVIEWS S S. Growth and physical performance relative to the timing of the adolescent spurt[J]. *Exercise and Sport Sciences Reviews*, 1988, 16(1):503-540.
- [23] ROUND J M, JONES D A, HONOUR J W, et al. Hormonal factors in the development of differences in strength between boys and girls during adolescence: A longitudinal study[J]. *Annals of Human Biology*, 1999, 26(1): 49-62.
- [24] PARKER D F, ROUND J M, SACCO P, et al. A cross-sectional survey of upper and lower limb strength in boys and girls during childhood and adolescence[J]. *Annals of Human Biology*, 1990, 17(3):199-211.
- [25] WOODS S, O'MAHONEY C, MAYNARD J, et al. Increase in volitional muscle activation from childhood to adulthood: A systematic review and meta-analysis [J]. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 2022, 54(5):789-799.
- [26] CHALCHAT E, PIPONNIER E, BONTEMPS B, et al. Characteristics of motor unit recruitment in boys and men at maximal and submaximal force levels[J]. *Experimental Brain Research*, 2019, 237(5):1289-1302.
- [27] GILLIAM T B, VILLANACCI J F, FREEDSON P S, et al. Isokinetic torque in boys and girls ages 7 to 13: Effect of age, height, and weight [J]. *Research Quarterly American Alliance for Health, Physical Education, Recreation and Dance*, 1979, 50(4):599-609.
- [28] MALINA R M, BOUCHARD C, BAR-OR O. Growth, maturation, and physical activity[M]. Champaign: Human Kinetics, 2004.
- [29] STOCKER B, NYLAND J, CABORN D. Concentric isokinetic knee torque characteristics of female volleyball athletes[J]. *Isokinetics and Exercise Science*, 1996, 5(3-4):111-114.
- [30] CROIX M D S, DEIGHAN M, ARMSTRONG N. Functional eccentric-concentric ratio of knee extensors and flexors in pre-pubertal children, teenagers and adult males and females[J]. *International Journal of Sports Medicine*, 2007, 28(9):768-772.
- [31] SEGER J Y, THORSTENSSON A. Muscle strength and electromyogram in boys and girls followed through puberty[J]. *European Journal of Applied Physiology*, 2000, 81(1):54-61.
- [32] NEWELL K M, DEUTSCH K M, MORRISON S. On learning to move randomly[J]. *Journal of Motor Behavior*, 2000, 32(3):314-320.
- [33] SMITS-ENGELSMAN B, WESTENBERG Y, DUYSSENS J. Development of isometric force and force control in children[J]. *Cognitive Brain Research*, 2003, 17(1):68-74.
- [34] WINTER D A, ROBERTSON D. Joint torque and energy patterns in normal gait [J]. *Biological Cybernetics*, 1978, 29(3):137-142.
- [35] THELEN E, ZERNICKE R, SCHNEIDER K, et al. The role of intersegmental dynamics in infant neuromotor development[J]. *Advances in Psychology*, 1992, 87:533-548.
- [36] ASSAIANTE C, MALLAU S, VIEL S, et al. Development of postural control in healthy children: A functional approach[J]. *Neural Plasticity*, 2005, 12(2-3):109-118.
- [37] SHUMWAY-COOK A, WOOLLACOTT M H. The growth of stability: Postural control from a developmental perspective[J]. *Journal of Motor Behavior*, 1985, 17(2):131-147.
- [38] FORSSBERG H, NASHNER L M. Ontogenetic development of postural control in man: Adaptation to altered support and visual conditions during stance[J]. *Journal of Neuroscience*, 1982, 2(5):545-552.

(责任编辑:刘畅)