



编者按:当前,青少年体育运动受到了世界各国教育部门、体育部门乃至医疗卫生部门的极度重视,有关青少年体育运动的研究则显得日益重要和迫切,如青少年有氧能力的评估和训练问题、青少年运动猝死的预防问题等。

基于此,在美国伊利诺伊大学终身教授、博士生导师,美国运动科学院院士朱为模先生的推荐和组织下,本刊取得了美国体育与健康教师协会(Society of Health and Physical Educators, SHAPE)的授权,引进了几篇发表在2017年美国SHAPE主办的《运动与体育研究季刊》(Research Quarterly for Exercise and Sport)中的相关热点文章。希望这些世界性的学术前沿,能够引起国内外更多学者更为广泛的关注和研究。

峰值摄氧量($p\dot{V}O_2$)是国际公认的评估有氧能力的最佳单项指标,也是与青少年有氧能力最具相关性的标准,但对它的评估、解释、可否加以训练,以及它与青少年儿童成长和成熟过程中其他健康相关变量的关系,目前国内外研究较少,且存在很多争议。英国埃克塞特大学的Neil Armstrong在《与青少年有氧能力相关的10个问题》中,对当前有关青少年有氧能力的研究进行综述,并提出了十大需要研究和解决的突出问题。但这十大问题清单,并未能够终结对青少年有氧能力可训练性的争议,来自布鲁克大学的Raffy Dotan从儿童-成年人之间可训练差异性是否存在的角度对Armstrong文中的一些观点提出了质疑。随即Armstrong又发文对Dotan提出的问题逐一给予回应。3篇文章围绕青少年有氧能力展开深度讨论,传递了大量的世界前沿信息,同时引发了广大研究者的深层次思考,为青少年有氧能力方面的未来研究指明方向。

运动猝死是运动医学领域面临的最严重的世界性问题之一。Rachal K. Katch等人在《排名前10的与预防运动与体育活动猝死相关的关键问题》中聚焦青少年群体,提出了10个与运动和体育活动中猝死的主要原因及其治疗手段有关的关键问题,为未来进一步强化循证实践原则,以防止青少年运动和体育活动中的猝死事故奠定了基础。

与青少年有氧能力相关的10个问题

Neil Armstrong(英)¹,朱为模² 审校

摘要:峰值摄氧量($p\dot{V}O_2$)是国际公认的青少年有氧能力评估标准,尽管有近八十年的青少年数据,但对它的解释以及它与青少年儿童成长和成熟过程中其他健康相关变量的关系,仍存在争议。有关青少年有氧能力可训练性的争论从未停止,仍然需要解决训练导致变化的因果机制以及根据年龄、生物性成熟、性别等因素进行调整。青少年日常体育活动的特点是间歇性进行和强度的迅速变化,但大多数青少年很少进行用来确定峰值摄氧量的强度和持续时间的体育活动。在这个背景下,肺部摄氧量的瞬态动力学就可以最好地反映青少年的有氧能力。对不同强度运动开始时青少年肺部摄氧量动力学的严格研究非常少,而在运动强度的阶跃变化中,实足年龄、生物性成熟和性别因素的影响并没有得到充分证实。了解青少年肺部摄氧量动力学参数的可训练性主要基于对运动员和非运动员的少量比较研究,对训练导致变化的根本机制仍需进一步探索。文章的目标是对成长和成熟过程中的有氧能力提供简要概述,提高对其评估和解释争议的认识,找出知识差距,提出10个相关的研究问题,并指出未来研究的潜在领域。

关键词:青少年;儿童;摄氧量动力学;峰值;摄氧量

中图分类号:G804.2 文献标志码:A 文章编号:1006-1207(2018)02-0001-17

DOI: 10.12064/ssr.20180201

收稿日期:2017-11-03

作者简介:Neil Armstrong,男,教授,主要研究方向:儿童生理学、儿童运动与健康。E-mail:N.Armstrong@exeter.ac.uk。

审校者简介:朱为模,男,院士/教授,主要研究方向:测量与评价,运动健康。E-mail:weimozhu@uiuc.edu。

作者单位:1. 儿童健康与运动研究中心,埃克隆大学,英国;2. 美国伊利诺伊大学,美国。



Top 10 Research Questions Related to Youth Aerobic Fitness

Neil Armstrong¹, ZHU Weimo²(reviser)

(1.Children's Health and Exercise Research Centre, St Lukes Campus, University of Exeter, United Kingdom. 2.University of Illinois, American.)

Abstract: Peak oxygen uptake ($\dot{V}O_2$) is internationally recognized as the criterion measure of youth aerobic fitness, but despite pediatric data being available for almost 80 years, its measurement and interpretation in relation to growth, maturation, and health remain controversial. The trainability of youth aerobic fitness continues to be hotly debated, and causal mechanisms of training-induced changes and their modulation by chronological age, biological maturation, and sex are still to be resolved. The daily physical activity of youth is characterized by intermittent bouts and rapid changes in intensity, but physical activity of the intensity and duration required to determine peak $\dot{V}O_2$ is rarely (if ever) experienced by most youth. In this context, it may therefore be the transient kinetics of pulmonary $\dot{V}O_2$ that best reflect youth aerobic fitness. There are remarkably few rigorous studies of youth pulmonary $\dot{V}O_2$ kinetics at the onset of exercise in different intensity domains, and the influence of chronological age, biological maturation, and sex during step changes in exercise intensity are not confidently documented. Understanding the trainability of the parameters of youth pulmonary $\dot{V}O_2$ kinetics is primarily based on a few comparative studies of athletes and nonathletes. The underlying mechanisms of changes due to training require further exploration. The aims of the present article are therefore to provide a brief overview of aerobic fitness during growth and maturation, increase awareness of current controversies in its assessment and interpretation, identify gaps in knowledge, raise 10 relevant research questions, and indicate potential areas for future research.

Key Words: Adolescents; children; oxygen uptake kinetics; peak oxygen uptake

有氧能力可以定义为在运动过程中向肌肉输送氧气并利用它产生能量以支持肌肉活动的的能力。最大摄氧量($\dot{V}O_{2max}$)是到力竭时肌肉所摄入的氧气含量,是有氧能力的最佳单项指标,也是近八十年以来青少年有氧能力的评估标准。 $\dot{V}O_{2max}$ 是儿童运动生理学中最全面记录的实验室确定变量,但对它的评估、解释、可训练性以及它与成长和成熟过程中其他健康相关变量的关系仍然存在争议。

$\dot{V}O_{2max}$ 会限制有氧能力,但它并没有限定有氧能力。在日常生活中,年轻人的自发游戏和参与运动更多是以短时间、间歇式运动以及快速变化运动强度的形式出现。在这些条件下, $\dot{V}O_{2max}$ 可以被视为一个方便研究的变量,而不是一个支持运动行为的主要生理变量,峰值摄氧量($p\dot{V}O_2$)动力学才能最好地描述有氧能力。与 $\dot{V}O_{2max}$ 研究相比,针对青少年在运动强度递增时肺部摄氧量动力学反应的研究较少。对青少年肺部摄氧量动力学反应的可训练性的研究则更少,目前的研究主要是针对青少年运动员和非运动员的比较分析。

当前研究已认识到有氧能力的其他几个指标包括血乳酸和通气阈值、运动经济性和恢复峰值摄氧量动力学,但本文的研究重点是 $\dot{V}O_{2max}$ (或 $p\dot{V}O_2$)以及运动开始时的 $p\dot{V}O_2$,这是青少年有氧能力的两个最具相关性的标准。本文旨在对当前研究进行综述,

阐明在评估和解释方面的争议,找出知识差距,并提出 10 个相关的研究问题,为青少年有氧能力方面的未来研究指明方向^[1-3]。

与青少年有氧能力相关的 10 个研究问题。

(1) $p\dot{V}O_2$ 是否是青少年有氧能力的最高指标?它是否可以在各项研究中进行可靠比较?

(2) $p\dot{V}O_2$ 是否会随着时间的变化而变化?在青少年的峰值摄氧量中是否有性别差异?

(3)是否应当使用比率量表来解释在成长和成熟的过程中 $p\dot{V}O_2$ 与体重的关系?

(4)当今的青少年在有氧能力方面是否达到标准? $p\dot{V}O_2$ 在过去的八十年里是否呈下降的趋势?

(5)青少年的 $p\dot{V}O_2$ 是否可以通过训练来加强?是否存在阈值?

(6)青少年的 $p\dot{V}O_2$ 是否与习惯性参加体育活动相关?

(7)运动开始时青少年出现摄氧量时摄氧动力学反应的第一阶段是否与实足年龄、生物性成熟或性别有关?

(8)运动开始时低于最大气体交换阈值的青少年 $p\dot{V}O_2$ 是否与实足年龄、生物性成熟或性别相关?

(9)运动开始时高于最大气体交换阈值的青少年 $p\dot{V}O_2$ 是否与实足年龄、生物性成熟或性别相关?

(10)青少年 $p\dot{V}O_2$ 是否可以通过训练来提高?



峰值摄氧量: Hill 和 Lupton 在英格兰进行的开创性研究首次提出了最大摄氧量的概念。通过携带道格拉斯气袋按照不同速度进行跑步测试,测出了 $\dot{V}O_2$ 的比率,并观察到跑步速度和 $\dot{V}O_2$ 存在线性关系,最后在力竭时 $\dot{V}O_2$ 趋向平稳状态^[4]。在实验室的跑步机上进行进阶研究,基于当 $\dot{V}O_2$ 达到稳定状态时即达到 $\dot{V}O_{2max}$ 的概念,研究当运动负荷增加时 $\dot{V}O_2$ 的反应。在 20 世纪 30 年代末,一些青少年参与了 $\dot{V}O_{2max}$ 的实验室测定。

在哈佛大学^[5]和芝加哥大学^[6],用跑步机方案对 6~18 岁男性儿童的 $\dot{V}O_{2max}$ 进行了第一次实验研究,在研究过程中,首先在一个坡度为 8.6% 的跑步机上以每小时 3.5 英里的速度跑 15 min,然后休息 10 min,再在坡度为 8.6% 的跑步机上以每小时 6 英里或每小时 7 英里的速度跑到力竭为止。1952 年, Astrand 在斯堪的纳维亚发表了一篇博士论文,这是一项首次同时纳入男性儿童和女性儿童的研究,参与者的年龄为 4~18 岁。根据这 3 项研究的报告, $\dot{V}O_{2max}$ 与体重成正比 (mL/kg/min),但 Astrand 对该方法是否与儿童相关持保留意见(见研究问题 3)^[7]。

Astrand^[7]对 Robinson^[5]和 Morse^[6]等人使用的跑步机方案进行了质疑,他认为“从研究者的角度来看当然是很实用的,但从受试对象的角度来看却不是如此,特别是对 6~10 岁的儿童”。他评论道,根据运动方案和运动后的血乳酸浓度来看,“在几个案例里,运动一定曾接近极限水平”,Morse 等人也承认了这一点,他们报告称,“毫无疑问,所有男性儿童并没有达到同样的力竭程度,按照每小时 7 英里的速度跑 5 min 后,有些孩子还没有到达自己的能力极限^[6]。在我们讨论最大值时,必须要考虑这个因素。”Astrand 也在自己的研究中观察到,当达到力竭状态时,140 名研究对象的跑步实验中只有 70 名研究对象的 $\dot{V}O_2$ 达到稳定状态。先前研究的方法经验很好地引入了第一个研究问题,并为后续出现的研究问题提供了基础。

1 $\dot{V}O_2$ 是否是青少年有氧能力的最高指标?它是否可以在各项研究中进行可靠比较?

尽管在过去大约 30 年里的现存文献中很少明确提及这个问题,但很多后续研究^[8]都确认了 Astrand 的观察结果,即大约有 50% 的青少年没有达到 $\dot{V}O_2$ 的稳定状态。一些研究者认为,一些孩子在自己表示力竭时,并没有达到 $\dot{V}O_2$ 的稳定状态,这与激励不够或无氧运动能力低有关。Armstrong、Welsman^[9]和 Winsley^[10]通过实验回答了这个问题,他们

在 3 次、每次相隔 1 周的实验中测定了 40 名 9 岁儿童(其中 20 名女性儿童)的 $\dot{V}O_2$ 。先用递增负荷运动测试达到自己表示力竭的状态来初步确定 $\dot{V}O_2$,然后进行两次“超过最大程度”的实验,让参与者按照第一次实验结束时的相同速度跑步,并且坡度比第一次实验时达到的最高坡度分别高出 2.5% 和 5.0%。在第一次实验中,只有大约 33% 的参与者达到了 $\dot{V}O_2$ 的稳定状态,但是在这 3 次实验中,都没有观察到女性儿童或男性儿童 $\dot{V}O_2$ 平均值具有显著差异。数据表明,通过单次递增负荷运动测试达到实验对象自己表示力竭的状态,可以达到最大值。然而,由于按照惯例, $\dot{V}O_{2max}$ 这个词表明已经达到 $\dot{V}O_2$ 的稳定状态,在儿童运动科学中,通常会参考在运动试验中达到自己表示力竭为止观察到的 $\dot{V}O_{2max}$,将其作为 $\dot{V}O_2$,并且在本文中采用该术语。

关于报告的 $\dot{V}O_2$ 是否可以被视为个人有氧能力的峰值这个问题经常被提起,但通过大部分研究通常采用的单项试验却无法简单确认儿童或青少年是否真正达到力竭。建议采用一些运动结束时的“次要标准”来进行确认,如:心率的预设值(如: $HR \geq$ 预测最大心率的 85%~90%)、气体交换率(如: $R \geq 1.00$)、血乳酸浓度(如: ≥ 6.0 mmol/L),但它们的理论依据都存在问题,不仅要考虑到个体差异,还要依赖运动方案和测力计。例如:在递增负荷跑步机和功率自行车测力计试验中,8~16 岁青少年的最大心率分别为(200±7)次/分和(195±7)次/分,由于心率通常是在 $\dot{V}O_2$ 之前达到峰值,而不是与其同时或之后,因此当前心率值 \geq 预测最大心率的 85%~90% 并不能确定个人的努力达到峰值。相关研究已经证明,如果根据“次要标准”(心率、气体交换率和血乳酸浓度)结束试验,对儿童的 $\dot{V}O_{2max}$ 平均会低估大约 10%~22%,但由于不符合“次要标准”而否定某项试验结果可能会导致错误地排除了真正的峰值^[11]。

关于将 $\dot{V}O_2$ 确定为真正峰值的方法并没有达成共识,这对青少年有氧能力及相关解释的理解造成了一定混乱,例如健康和良好的身体状态。为了确保在单项试验中获得可靠数据,似乎有必要用“超过最大程度”试验进行一次初始运动试验,以确认 $\dot{V}O_2$ 的峰值。适用的例子是短时间斜坡试验(8~10 min)到力竭,约 15 min 后再进行一次“超过最大程度”试验,例如 Barker 等人所述的试验。根据间隔时间为 1 周的 3 次斜坡儿童试验,确定的 $\dot{V}O_2$ 的误差大约为 4%^[11]。Barker 等人建议了“超过最大程度”试验,包括在 10 周进行 2 min 的热身,之后再阶跃变化为初



始斜坡试验,最后得出的峰值能力的 105%^[12]。对于青春期前的儿童,到力竭为止的时间大约为 90 s(即: >4 倍常数 $[\tau]$;关于 τ 的说明,请参考肺部摄氧量动力学章节)。在少数 $p\dot{V}O_2$ 高于初始坡道试验的情况下,在完全恢复后,“超过最大程度”试验可以按照最大能力的 110% 重复进行。由于青少年具有从力竭运动中迅速恢复的能力,因此有助于采用这种方法^[13],并且已经在广泛的有氧能力研究中使用^[14]。

除了适当的运动方案外,确定 $p\dot{V}O_2$ 还需要了解环境条件,并准确测量每个单位时间吸入和/或呼出的空气,以及其中氧气和二氧化碳的比例。配备适当校准设施的呼吸气体分析系统在研究实验室是很常见的,但儿童生理学家在使用主要设计用于成人的仪器测量儿童对运动的呼吸反应时必须谨慎(如:吹嘴/面罩和呼吸阀死区的大小以及根据儿童体格决定混合腔的容量)。Breath-by-breath(每次呼吸)法分析系统越来越受欢迎,但它受到了与运动儿童 $p\dot{V}O_2$ 反应幅度有关的内部呼吸的大幅变化的挑战^[15]。Breath-by-breath 法取样间隔可能会对报告的 $p\dot{V}O_2$ 产生重大影响。取样间隔短会增加测量 $p\dot{V}O_2$ 的可变性,当 $p\dot{V}O_2$ 较小时,青少年比成人的可变性更大。相反,取样间隔长可能会使数据变得“过于平稳”,并人为降低真正的 $p\dot{V}O_2$ 反应。青少年的最佳取样间隔为大约 15~30 s,但无论选择多长的间隔时间,都应当记录和报告(综述)。

从前面的讨论可以看出,虽然有关青少年 $p\dot{V}O_2$ 的研究已经有近八十年时间,但对适当的实验方案、数据采集或峰值确认仍然没有达成共识。因此,迫切需要批判性地审查、设计、验证和协调方法,从而对青少年有氧能力进行有意义的跨研究比较,并研究其对运动、健康和良好身体状况的影响。加州大学欧文分校的儿童运动网络工作组正在解决这个问题^[16,17],但是仍然需要推进研究人员和期刊编辑的国际合作。

2 $p\dot{V}O_2$ 是否会随着时间的变化而变化? 在青少年的峰值摄氧量中是否有性别差异?

关于青少年的 $p\dot{V}O_2$ 有广泛记录,但是应当根据先前的方法讨论进行解释。大部分数据来源于功率自行车肌力测试或跑步机测试。来自两种形式的数据之间的皮尔逊积差相关系数为 0.90,但在跑步机上测得的 $p\dot{V}O_2$ 通常比在功率自行车测力计上测得的数据大约高出 8%~10%^[18]。因此,尽管研究之间的数据趋势是一致的,也不应该将来自两个测力计的

数据进行合并分析。同样,对 8 岁以下儿童的 $p\dot{V}O_2$ 的有效性也产生了质疑,Robinson 的原始研究表示:“当最小的男性儿童不再感到有趣时,就不愿意继续了,而所有 8 岁及以上的男性儿童在出现第一次疲劳信号后仍然在鼓励下继续坚持了一段时间”^[15]。因此,目前的讨论将会强调 $p\dot{V}O_2$ 的趋势,而不是引用绝对值(L/min),并且在本文中全文的关注重点都将是 8 岁及以上青少年的更可靠的数据库。

根据从大约 5 000 次功率自行车测力计和大约 5 000 次跑步机测定研究中获得并独立分析的数据,显示 8~16 岁男性儿童的 $p\dot{V}O_2$ 以近线性方式上升了大约 150%。女性儿童的数据呈现了类似趋势,在相同年龄范围内 $p\dot{V}O_2$ 上升了大约 80%,但根据女性儿童的数据,在 14 岁左右时出现了趋平现象^[8]。

纵向研究提供了更详细的分析,但很少有纵向研究报告广泛年龄范围内的数据,并将 $p\dot{V}O_2$ 的严格测定与大量样本联系。Armstrong 和 McManus 从跑步机测定 $p\dot{V}O_2$ 的纵向研究中整理了数据^[19],研究纳入了 1 818 个男性儿童和 707 个女性儿童为研究对象^[19-24],并对趋势进行了汇总。男性儿童的数据是一致的,并且以类似于横向研究的方式上升。根据纵向数据显示,8~18 岁男性儿童的 $p\dot{V}O_2$ 上升了大约 150%,最大的上升率出现在 13~15 岁。女性儿童的数据显示,8~17 岁的 $p\dot{V}O_2$ 上升了大约 88%,在 8~13 岁之间呈现逐渐上升趋势,从 14 岁左右出现趋平现象。Mirwald 和 Bailey 记录了 $p\dot{V}O_2$ 的陡增与两性的生长速度高峰一致的证明^[23],Geithner 等人也记录了这一观察现象^[25]。

根据横向数据表明,10 岁男性儿童的 $p\dot{V}O_2$ 平均比 10 岁女性儿童高出 10% 左右,到 12 岁时该性别差异上升到 25% 左右,14 岁为 30%,16 岁为大约 35%。纵向数据显示了类似的趋势,但是研究之间性别差异在 12~14 岁时有所不同,这可能是由于生理成熟的时间和节奏的个体差异造成的。目前认为,性别差异是多种生理因素的结合,包括机能能力、身体组成和血红蛋白浓度的差异。有研究认为是否参加习惯性体育活动(Habitual Physical Activity, HPA)是一个影响因素,但没有令人信服的证据表明 $p\dot{V}O_2$ 和习惯性体育活动之间存在有意义的关系^[19]。

在青春期,对 $p\dot{V}O_2$ 的最大影响因素是肌肉质量。男性儿童的较大肌肉质量不仅能提高运动中的总肌肉摄氧量(肌肉摄氧量),并且通过外周肌肉泵,它还能增加到心脏的静脉回流,从而提高心搏量(Stroke Volume, SV)。通过在青少年后期提高血红蛋白浓度,可以进一步增加男性儿童对肌肉的氧输



送。但是在儿童时期,性别差异对肌肉质量和血红蛋白浓度的影响很小(见研究问题3),研究显示,青春期前男性儿童的 $p\dot{V}O_2$ 显著高于青春期前女性儿童^[19]。

关于青春期前性别差异对 $p\dot{V}O_2$ 的影响解释是有争议的。近年来,通过非侵入性技术在发展生理学上的应用,已经产生了一些有趣的但到目前为止通常相互矛盾的数据。没有令人信服的证据表明性别差异对最大心率是否存在影响,有两项使用多普勒超声心动图的研究认为青春期前性别差异对 $p\dot{V}O_2$ 产生的影响,是由于男性儿童具有较高的心输出量(cardiac output, \dot{Q})和心搏指数造成的,但它们对心脏大小和心肺功能的影响却提出了相反的观点。Vinet 等人总结认为,性别差异是由于心脏大小的差异造成的^[26],而 Rowland、Goff、Martel 和 Ferrone 则认为,心脏功能因素(骨骼肌泵功能、全身血管阻力和肾上腺素的反应)是造成男性儿童在儿童时期最大心输出量的原因,而不是本身的左心室大小^[27]。

与此相反,一项使用胸腔阻抗法来估计在 $p\dot{V}O_2$ 下的心输出量的研究表明,青春期前的男性儿童与女性儿童相比具有较大的动静脉血氧差(a- vO_2 差),在最大心输出量和最大心搏量方面没有差异^[28]。同样的研究发现,休息时的磁共振成像显示,在后壁厚度、间隔壁厚、左室心肌质量、左室心肌体积、左室收缩末期室容积或左室舒张末期室容积方面都没有明显的性别差异。

McNarry 等人在达到自己表示力竭状态的斜坡运动试验中用近红外光谱监测了脱氧血红蛋白和肌红蛋白的变化,并且发现了在氧输送和耗氧量之间的平衡中的性别差异^[29],这项试验可能为青春期前的性别差异以及年龄相关的变化对 $p\dot{V}O_2$ 的影响提供了帮助。

因此,需要进行更多的纵向研究以探索从儿童和青少年时期到进入成年早期影响有氧能力的生理因素。还需要研究支持与实足年龄相关的上升和性别差异对 $p\dot{V}O_2$ 影响的机制。

3 是否应当使用比率缩放来解释在成长和成熟的过程中 $p\dot{V}O_2$ 与体重的关系?

青少年 $p\dot{V}O_2$ 与体重相关,研究人员通常只需用 $p\dot{V}O_2$ (mL/min)除以单位为公斤的总体重(实际体重)并将其用比率表示(mL/kg/min),即可“控制”体重差异。但是,按照比率缩放的相对 $p\dot{V}O_2$ 受到大部分代谢惰性脂肪量的影响严重,并且,当用 mL/kg/min 对 $p\dot{V}O_2$ 进行分析时,会出现与用绝对值(L/min)时明显不同的趋势,8~18岁男性儿童的

$p\dot{V}O_2$ 变化出现略微下降或保持不变,而女性儿童的 $p\dot{V}O_2$ 在青春期里会出现逐渐下降的趋势^[19]。

比率缩放可以提供一定的信息,例如在监测青少年运动员的运动表现时,但将从事各种运动(如:艺术体操和美式足球)的青少年运动员的 $p\dot{V}O_2$ 按照 mL/kg/min 进行比较是毫无用处的。比率缩放会混淆对成长和成熟过程中 $p\dot{V}O_2$ 的生理理解,并且让有氧能力和其他健康相关变量之间出现伪相关性。

Tanner 早在 1949 年就描述了使用比率缩放的谬误^[30],如前所述,Astrand 也在 1952 年批评了它在表现儿童 $p\dot{V}O_2$ 时的限制^[7],在过去几十年里也经常会出现对使用它的批评性评论^[31-34],然而研究人员还是坚持报告,并且在学术期刊上也继续将比率缩放后的相对 $p\dot{V}O_2$ 作为在任何环境下青少年有氧能力的主要(或者通常是唯一的)变量。对关于人体运动数据理论基础的探索(如:体重、瘦体重、腿部肌肉质量、身高、肢体长度)等都不在当前讨论的范围内,但有兴趣的读者可参考 Welsman 和 Armstrong^[35]的研究,其中阐述了异速生长和多层模型的理论基础,并且将其应用到了几组青少年数据中。但是,很容易就可以证明按体重的比率缩放是不合适的,并且可以提供相关例子,证明它不仅模糊了对青少年有氧能力的理解,并且还歪曲了它与生物过程和其他健康相关变量的关系。

一个不受体重影响的变量在这种情况下意味着 $p\dot{V}O_2$ (mL/kg/min)与体重(kg)之间的相关系数应该近乎于零。而大量数据显示,比率缩放后的相对 $p\dot{V}O_2$ 与体重呈现显著负相关,因此表明比率缩放无法消除体重的影响。而另一方面,用异速增长缩放(allometric scaling)处理同一数据显示, $p\dot{V}O_2$ 与体重相关近乎于零,这表明这样产生的变量已经排除了体重的影响^[19]。

比率缩放“过大”调整会对体重较轻的青少年有利,对体重较重(更成熟或超重)的不利。使用异速增长分析的横向研究^[36]和使用多层模型控制体重的纵向研究^[2]都质疑了对成长过程中 $p\dot{V}O_2$ 的传统(比率缩放)解释,并且明确显示,无论体重如何,两性在 $p\dot{V}O_2$ 上都显示出了逐步提高的趋势。此外,有研究称比率缩放后的相对 $p\dot{V}O_2$ 与生物性成熟无关^[37];但是它屏蔽了有氧能力与生物性成熟之间真正的关系。有几项研究表明,根据实足年龄以及用异速增长^[38]或多层模型^[2]适当控制的体重,在两性中,生物性成熟对 $p\dot{V}O_2$ 都具有显著的附加、增量效应。

在一篇颇有见地的评论中,Loftin 等人对几项调查进行了评估,在这些调查中, $p\dot{V}O_2$ 与体重的比率缩



放混淆了对超重 / 肥胖青少年的有氧能力的理解^[32]。评估人员用自己的数据显示了通过计算 $p\dot{V}O_2$ (mL/kg/min) 和体重 (kg) 之间的显著负相关 ($r=-0.47$)，比率缩放因此不适用于控制肥胖人群的体重^[39]。然后，他们通过实证举例提出超重 / 肥胖青少年的 $p\dot{V}O_2$ (L/min) 高于正常体重的同龄人，但用体重比率 $p\dot{V}O_2$ (mL/kg/min) 缩放后的则低于正常体重同龄人。然而如果用异速增长缩放后的 $p\dot{V}O_2$ ，差异会显著减少或无差异。Loftin 和同事总结报道，用体重比例表示 $p\dot{V}O_2$ 除了反映有氧能力以外，还同时反映超重或肥胖状态^[32]。他们还分析了关于肥胖青少年的 $p\dot{V}O_2$ 与心血管危险因素的关系，认为对超重青少年的有氧能力和心血管危险因素之间的推定关系可能会因为被使用比率缩放后的相对 $p\dot{V}O_2$ 所误解，且比有氧能力更能反映肥胖状态。

很多与实足年龄相关以及与生物性成熟相关的 $p\dot{V}O_2$ 的上升都反映了肌肉质量的增加，因此， $p\dot{V}O_2$ 与肌肉质量具有一定相关性。有些研究人员坚定地认为，由于大部分活动主要受到腿部肌肉的驱动，因此 $p\dot{V}O_2$ 最好与腿部肌肉质量或肌肉量呈异速生长比例，而不是体重^[40]。Graves 等人用经验表明，在对儿童的 $p\dot{V}O_2$ 进行解释时， $p\dot{V}O_2$ 与双腿的瘦肌肉质量 (Lean Muscle Mass, LMM) 和瘦体重 (Lean Body Mass, LBM) 的比例都高于与体重的比例^[41]。但是对青少年的 LMM 和 LBM 的测定是非常复杂、耗时并且相对代价高昂的，体重将可能继续作为一个主要的指标，特别是在大型研究中。随着评估 LMM 和 LBM 的技术的成熟，它们在有些情况下可能会在分析青少年的 $p\dot{V}O_2$ 时作为异速增长缩放变量为体重提供补充。

有可信的证据记录了儿童和青春期的比率缩放 $p\dot{V}O_2$ 的谬误，但在现存文献中却经常被忽视。需要进行更多以研究为主导的潜在缩放变量评估，从而为讨论提供信息。在解决问题的背景下，必须采用以证据为基础的合适的缩放方法，以提高对青少年 $p\dot{V}O_2$ 的生理理解，阐明它与成长和成熟过程中健康相关变量的关系，并探索当前青少年有氧能力的水平。

4 当今的青少年在有氧能力方面是否达到标准？ $p\dot{V}O_2$ 在过去的 80 年里是否呈下降的趋势？

在青少年有氧能力 ($p\dot{V}O_2$) 方面尚没有公认的国际标准^[17,42]。健康志愿者的 $p\dot{V}O_2$ 综合研究显示，典型的变异系数约为 15%，青少年运动员比未经训练的健康同龄人通常要高出大约 40%~50%，但对于

是什么构成了健康青少年的低、可接受或高 $p\dot{V}O_2$ 没有达成一致意见。

对 $p\dot{V}O_2$ 的实验室测定不仅代价高昂和耗时，而且还要依赖于复杂的设备和熟练的技术协助。因此促使了一些研究人员通过现场运动能力试验来预测青少年的 $p\dot{V}O_2$ 。很多现场试验都是通过 20 m 折返跑进行的，这也是目前对青少年最大运动能力最流行的国际试验方法^[43]。最近基于 50 个国家的超过 100 万次试验发布了 20 m 折返跑的年龄和性别标准^[44]，但是完成的折返跑的次数并不是有氧能力的生理指标。折返跑运动能力是一项受到心理、体能和生物力学因素以及生理变量综合影响的最大自愿运动能力的指标^[45]。

青少年有氧能力与健康之间的积极关系已经得到了很好的证明^[46]，并且在至少 30 年里，各种不同的青少年有氧能力“健康阈值”也经常被提出，有的是基于专家意见^[47]、有的是根据成年人数据的推断，还有的根据与心血管代谢危险因素的统计关系等^[48]。但没有现存数据证明存在一个 $p\dot{V}O_2$ 可以代表与青少年健康和良好身体状况相关的特定阈值。建议的“健康阈值”通常可以用类似的论点进行比较和支持，但是没有一个是针对青少年 $p\dot{V}O_2$ 的直接测定。对它们都进行了一定折衷，忽略了生物性成熟的时间和节奏带来的重大影响，特别是通过与体重的比例来表示 $p\dot{V}O_2$ 建议。通常不可能进行大研究，用直接测定的 $p\dot{V}O_2$ 来准确计算符合建议的“健康阈值”的参与者的比例。但是，在英国对未经训练的志愿参与者进行了两项研究，重新分析了用跑步机测定的 $p\dot{V}O_2$ ，研究表明在 220 名 12~15 岁的青春期前的孩子 (其中 107 名女性儿童)^[49] 中超过 97%，在 164 名 11 岁青春期前的孩子 (其中 53 名女性儿童)^[50-51] 中 100% 达到了 Bell 等人建议的“健康阈值”^[47]。

尽管经常有相反的说法，但没有令人信服的经验性证据表明当代年轻人的 $p\dot{V}O_2$ 较低^[52]。对于青少年有氧能力现状的研究和宣传以及它与健康和良好身体状况的推定关系，必须根据有氧能力的明确定义以及对成长和成熟过程中它的评估和解释的说明进行重新评估。

低水平青少年 $p\dot{V}O_2$ 还有待证实，但有氧能力是否随着时间的推移下降？对青少年有氧能力的研究必须根据研究问题 1~3 中列出的方法和宣传的阐明限制进行解释，但总体而言，随着时间推移的摄氧量数据汇编表明，在几十年里针对青少年 $p\dot{V}O_2$ 的研究表现出了总体一致性，特别是以男性儿童为研究



对象^[53-55]。对来自不同实验室使用不同的设备和运动方案的数据进行比较是很有趣的,但是它们只能提供对青少年 $\dot{V}O_2$ 的时间趋势的部分了解。文献综述并不是流行病学研究的有效替代,只是一系列离散的调查,提供了对志愿参与者的 $\dot{V}O_2$ 的有限的反映,并不一定能够代表作为抽样来源的人群。不过,几乎没有证据支持青少年 $\dot{V}O_2$ 随着时间推移出现下降的观点。在埃克塞特儿童健康和运动研究中心,大约有 3 000 名来自相同学生来源地区和学校的 8~18 岁的青少年在 30 年里测定的 $\dot{V}O_2$ 没有发生明显变化。

与 $\dot{V}O_2$ 相比,在过去的 40 年里,青少年 20 m 折返跑的运动能力出现了下降^[56-58],并且在通俗和科学文献里经常被误述为青少年有氧能力出现下降。有令人信服的证据表明,近几十年青少年的肥胖程度有所上升,而随着时间推移身体肥胖程度的上升解释了 20 m 折返跑运动能力下降大约 40%~60% 的原因^[59,60]。其他非生理因素的变化进一步导致了 20 m 折返跑运动能力的下降。由于大部分活动都涉及身体运动,因此 20 m 折返跑运动能力的长期性下降是一个值得关注和进一步研究的潜在因素,但是将 20 m 折返跑运动能力作为 $\dot{V}O_2$ 的代表是站不住脚的。

至少有 17 种不同的已发表方程根据 20 m 折返跑运动能力来预测青少年的 $\dot{V}O_2$,这些方程导致了对 $\dot{V}O_2$ 显著不同的估计^[44]。最近关于 $\dot{V}O_2$ 的一项青少年 20 m 折返跑运动能力的分析表明,用于估计 $\dot{V}O_2$ 的 20 m 折返跑的标准有效性在用于儿童和青少年时要显著低于成年人;此外,它还表明,超过 50% 的相关系数解释了不到 50% 的 $\dot{V}O_2$ 差异^[61]。此外,通过练习和各种训练方法可以提高折返跑的运动能力,但是却不会使 $\dot{V}O_2$ 出现相关上升^[62]。因此,使用 20 m 折返跑的得分来代替或预测 $\dot{V}O_2$ 不仅会严重歪曲青少年有氧能力,并且还有可能混淆与健康相关变量的推定关系。

为了提高知识,研究人员需要明确地解释、区分和证明青少年有氧能力方法的评估和解释。如果在后续的统计分析中与其他健康相关的形态学、心血管代谢或行为变量一起使用,或者将其纳入与青少年健康和良好身体状态相关的建议中,将会是至关重要的。目前,迫切需要对明确定义、直接测定和适当解释的青少年有氧能力与当前和未来的健康和良好身体状态之间的关系开展更多研究。

5 青少年的 $\dot{V}O_2$ 是否可以通过训练来加强? 是否存在阈值?

在一些关于训练对青少年有氧能力影响的早期研究中,经常认为它对 $\dot{V}O_2$ 影响很小或者没有影响,但是由于逻辑、实验设计、方法和分析的局限性,必须谨慎地对这些观察结果进行解释,对此在其他文献中有详细介绍^[56,63,64]。然而,值得注意的是,青少年可训练性的遗传率约为 50%^[65]。虽然很有可能有些人从基因上极具可训练性,而有些人几乎没有,还有这两种极端之间的范围,但在青少年的训练研究中很少考虑这些问题。基线 $\dot{V}O_2$ 与训练后的 $\dot{V}O_2$ 百分比呈负相关^[66],但是从很大程度上忽视了有很高比例的青少年习惯性体育活动可能会对研究参与者进行预训练的观点(见研究问题 6)^[42]。

最近发表的文献综述显示了 69 项已发表的训练研究和 21 项研究,这些研究严格探索了运动训练对青少年 $\dot{V}O_2$ 的影响(用于表格分析)^[56]。几乎所有研究都包含持续强度运动训练(Constant-intensity Exercise Training, CIET)项目,只是在频率、持续时间,特别是相对强度上有较大差异。大部分利用大约 85%~90% 最大心率的训练强度诱导 $\dot{V}O_2$ 显著上升,并且观察到没有出现显著变化的大部分研究都只采用了相对较低的运动强度(最大心率的 70%~80%)。该综述总结道,运动强度的高低至关重要,一种流行的说法即关于青少年对训练的反应比成年人“迟钝”的问题,可以用成年人可以在比青少年低的相对训练强度下提高 $\dot{V}O_2$ 进行解释。在唯一的一项让男性儿童^[67]和女性儿童^[68]接受与成年人一样的相对强度训练项目的研究中, $\dot{V}O_2$ 在男性儿童与成年男性之间以及女性儿童与成年女性之间均没有显著差异。与一项之前的综述一致^[61],没有找到可靠证据支持对青少年持续强度运动训练的 $\dot{V}O_2$ 反应的性别差异。

关于儿童的“成熟阈值”或“触发点”之前无法从训练中获益的概念,在过去大约 35 年里一直被用于儿童运动科学文献中。它源于 Gilliam 和 Freedson^[69]的研究,他们在 12 周时间里对 8 岁儿童的生活方式引入了一项增强体育计划。由于没有观察到 $\dot{V}O_2$ 出现明显变化,因此他们认为存在“一个成熟阈值,在达到这个阈值前,青春期前的儿童无法由于响应运动训练而引起生理变化”。1983 年, Katch 进一步发展了这个概念并假设,“在儿童时期有一个关键的时间阶段(称为‘触发点’),它与大部分儿童的青春期一致,但有些会出现得更早,在没



有达到这个阶段时,体育锻炼的效果很小,或者完全没有作用”。他认为,激素调节作用会促使青春期开始并影响功能发育和随之而来的机体适应。偶尔也有其他人针对 $p\dot{V}O_2$ 对训练反应的成熟效应提出了具有说服力的理论论据^[70],但没有有力的经验性证据支持这种说法。虽然承认大多数研究都是基于实足年龄而不是成熟状态的,但在对文献进行全面审查后,得出的一致结论是没有令人信服的经验性证据支持“成熟阈值”^[56,64,71]。虽然还没有发表最终的研究结果,但 McNarry 和她的同事最近进行了一系列观察研究,这些研究挑战了“成熟阈值”的假说^[72]。在他们最新的成果中,McNarry、Mackintosh 和 Stodefalko 监控了接受游泳训练和未接受训练的 10~12 岁男性儿童和女性儿童的 $p\dot{V}O_2$, 并采用了 3 个年度测量点^[73]。在每次测量时,接受游泳训练孩子的 $p\dot{V}O_2$ 高于未接受训练的孩子,并且随着测量的逐次进行,两组之间的差异逐渐扩大。用多层模型对数据进行分析后,研究人员发现 $p\dot{V}O_2$ 的上升与成熟状态的变化并没有相关性,因此不支持“成熟阈值”的假说。

目前的数据表明,青少年 $p\dot{V}O_2$ 的可训练性与实足年龄、生物性成熟和性别无关,因此成熟阈值假说仍然有待验证。然而,正如 Rowland 所说,有一些很有吸引力的线索表示,青春期的激素反应可能会调节有氧运动可训练性^[70]。为了阐明生物性成熟对 $p\dot{V}O_2$ 可训练性可能产生的影响,并严格测试“成熟阈值”假说,必须从得到良好控制的介入训练研究中获取包括两性的纵向数据,并且测量时间必须涵盖青春期前、青春期和青春期后这几个阶段。

高强度间歇训练(HIIT)已经被证明是提高成年人 $p\dot{V}O_2$ 的一种具有时效性的有效方法^[74]。HIIT 可以更好地反映青少年的习惯性体育活动模式,并且青少年可以比成年人更快从高强度运动中恢复^[13],但令人惊讶的是在儿童训练研究中很少使用 HIIT 方案。数据显示,在 20 多年前,青春期前的女性儿童可以通过 CIET 和 HIIT 提高自己的 $p\dot{V}O_2$ ^[51],但只是在最近才针对将 HIIT 作为提高青少年峰值摄氧量的方式进行了一项共同研究^[75]。在系统综述和元分析中,Costigan、Eather、Plotnikoff、Taaffe 和 Lubans 总结道,HIIT 是一种提高青春期峰值摄氧量的有效方式^[76],但是只有 8 项发表研究符合他们的标准,很明显,目前有关 HIIT 的研究处于相当缺乏的状态。

关于训练诱导青少年 $p\dot{V}O_2$ 变化的潜在机制研究,一直受到与测定 $\dot{V}O_{2max}$ 相关的道德和方法问题的限制,因此也限制了最大心输出量和最大动静脉

血氧差的计算。由少量的研究表明,青少年运动员和非运动员的最大动静脉血氧差相似,因此, $p\dot{V}O_2$ 中的训练诱导变化与氧输送的增加有关。由于最大心率没有在训练中上升,通常认为 $p\dot{V}O_2$ 提高是由于最大心输出量的提高。心肌的形态学和功能适应性被假设为是对 CIET 后最大心搏量升高的解释。对血容量增加、左心室内径和质量、心室内和后壁厚度、短轴缩短率和射血分数进行了假设,但已发表的结果却非常稀少并且相互冲突^[56,72]。

没有任何已发表研究专门对 HIIT 引起青少年 $p\dot{V}O_2$ 变化的机制进行研究,并且必须非常小心地用外推法将成年人数据用于青少年。但对成年人的训练干预表明,HIIT 引起的 $p\dot{V}O_2$ 上升主要原因是外周适应(氧利用)而不是中枢适应(氧输送)^[77]。因此,出现了一个有趣的问题,如果 CIET 主要引起中枢适应,而 HIIT 主要引起外周适应,这两种方案的组合是否会优化训练对青少年峰值摄氧量上升的促进作用?

经证明,通过采用适当的 8~12 周的 CIET 计划,平均可以将青少年的 $p\dot{V}O_2$ 提高大约 8%~9%^[56,64],但提高青少年 $p\dot{V}O_2$ 的 HIIT 计划的定量潜力仍然有待实现。通过更持续的 CIET、HIIT 和 / 或 CIET 和 HIIT 的组合可能会进一步提高 $p\dot{V}O_2$, 但目前还没有发表任何得到良好控制的研究。关于在成长和成熟阶段如何优化培训计划,以及阐明训练诱导变化在青少年 $p\dot{V}O_2$ 中的潜在机制,仍然需要进一步探索。

6 青少年的 $p\dot{V}O_2$ 是否与习惯性参加体育活动相关?

在青少年健康相关研究中,对 HPA 的定义是“在日常生活中的每个领域和任何维度中进行的日常体力活动”^[78],有氧能力($p\dot{V}O_2$)经常被错误地交换使用。HPA 是一种行为,而 $p\dot{V}O_2$ 是一个生理变量。它们并不是同义词,那么它们之间是否具有一种有意义的关系?

大家公认 $p\dot{V}O_2$ 受遗传因素影响, $p\dot{V}O_2$ 的遗传力估计大约为 50%。自发性活动行为遗传力研究的数据更加多变,儿童时期的遗传力估计为低到中,而在青春期则为中到高。关于遗传学的进一步评论已经超出了本文的范围,但有兴趣的读者可以参考最近的一篇专题综述^[79]。本文的重点是在实验室中直接确定青少年 $p\dot{V}O_2$ 的研究,并客观地评价了同一研究中的 HPA。

Seliger、Trefny、Bartenkova 和 Pauer 是第一个对 HPA 进行客观估计并将数据与直接测定的 $p\dot{V}O_2$ 进



行比较的研究小组^[80],他们从一天的心率监控开始,估算 11 名 12 岁男性儿童的 HPA,结果发现与 $\dot{V}O_2$ 之间没有相关关系。之后由几个欧洲国家进行的几项研究也确认了这些结果,并且一致报告称,在 $\dot{V}O_2$ 与 HPA 之间没有相关关系或者只有极弱的相关。按时间顺序对其他地方所有客观估计 HPA 和直接测定 $\dot{V}O_2$ 的定位研究进行了列表汇总^[81],可以说,1990 年前的研究对代表 HPA 的体育活动(PA)的监控时间不够长,表 1 列出了对 HPA 监控 3 d 以上的研究。根据现有的证据,通过定期审查文献得出的一致结论是,在最理想的情况下, $\dot{V}O_2$ 与 HPA 之间也只有极弱的相关^[82-83]。

纵向研究虽然较少,但却有力地加强了横向数据。有一项针对 202 名(其中 98 名女性儿童)11 岁以上儿童的研究,它采用多层模型研究了实足年龄、生物性成熟和体重对 HPA 的影响,在 3 年中每年测定一次。根据主要变量,将受控的 $\dot{V}O_2$ 作为一个附加变量引入模型,非显著参数估计表明,在 $\dot{V}O_2$ 与 HPA 之间没有显著关系。之后对至少用于中等强度体育运动(相当于健步走)的累计时间进行了分析,进行了与 $\dot{V}O_2$ 相关的 3 次连续 10 h 心

率监控,结果明显表明不仅在 HPA 与 $\dot{V}O_2$ 之间没有关系,并且至少中等强度的 PA 也会随着年龄显著下降,而在 11~13 岁的女性儿童和男性儿童中,以 L/min 为单位和按照体重适当标准化的 $\dot{V}O_2$ 都出现了显著上升^[22,84]。

阿姆斯特丹成长和健康纵向研究可能是至今为止对青少年健康和有氧能力最全面的纵向研究,根据对 HPA 和 $\dot{V}O_2$ 数据的分析,Kemper 和 Koppes 总结道:“如果我们考虑到近 23 年内导致非显著关系的用自回归计算的关系,我们必须承认,这一观察研究不能证明自由生活的男性和女性的 HPA 和 $\dot{V}O_{2max}$ 之间具有明确联系”^[85]。

现有的数据明确表明,HPA 与青少年的 $\dot{V}O_2$ 无关(或者最多也是很弱)。这一结果并不出乎意料,因为 HPA 通常缺乏与青少年 $\dot{V}O_2$ 提高相关的持续时间和强度^[86]。需要对客观估计 HPA 的方法做出进一步的发展和细化,因为似乎与 $\dot{V}O_2$ 不存在有意义的关系,研究人员应当探索其他有氧能力的方法,以明确青少年的 HPA 与有氧能力之间的关系。 $\dot{V}O_2$ 可以更好地反映青少年 HPA 的情况,并且可能会为研究提供一种更有效的途径。

表 1 青少年习惯性体育活动和峰值摄氧量

Table I Habitual physical activity and peak oxygen uptake in youth.

引用	参与者	体育活动估计方法	峰值摄氧量测定时采用的运动方式	结果
Armstrong、Balding、Gentle、Williams和Kirby (1990) ^[49]	111名女性儿童,85名男性儿童;年龄为11~16岁	3d心率监控	功率自行车测力计和跑步机	无显著关系。 在r=0.01到r=-0.26的范围里无显著相关系数。
Armstrong、McManus、Welsman和Kirby (1996) ^[87]	63名女性儿童,60名男性儿童;年龄为12.2岁	3d心率监控	跑步机	无显著关系 男性儿童在r=0.13到r=0.16的范围里无显著相关系数,女性儿童在r=-0.02到r=0.04的范围里无显著相关系数。
Armstrong、Welsman和Kirby (1998b) ^[88]	43名女性儿童,86名男性儿童;年龄为10~11岁	3d心率监控	跑步机	无显著关系。 在r=-0.15到r=0.09的范围里无显著相关系数。
Armstrong等人 (2000) ^[84]	98/70/79名女性儿童,104/73/81名男性儿童;从11~13岁进行纵向研究	3d心率监控	跑步机	在多层回归模型中,峰值摄氧量是对PA的非显著参数估计。
Ekelund等人 (2001) ^[89]	40名女性儿童,42名男性儿童;年龄为14~15岁	3d心率监控	跑步机	MVPA与峰值摄氧量之间无显著关系 (r = -0.04); AEE解释了峰值摄氧量变化的14%。
Eiberg等人 (2005) ^[90]	309名女性儿童,283名男性儿童;年龄为6~7岁	3d加速度计	跑步机	PA的持续时间解释了峰值摄氧量变化的9%。
Dencker等人 (2006) ^[91]	107名女性儿童,127名男性儿童;年龄为8~11岁	3~4d加速度计	功率自行车测力计	在一个多重前移回归分析中,VPA和MDPA一起解释了峰值摄氧量变化的10%(VPA 9%和MDPA 1%)。
Butte、Puyau、Adolph、Vohra和Zakeri (2007) ^[92]	424名未超重和473名超重;年龄为4~19岁	3d加速度计	跑步机	PA解释了峰值摄氧量变化的1%~3%。
Dencker、Bugge、Hermansen和Andersen (2010) ^[93]	222名女性儿童,246名男性儿童;年龄为6~7岁	4d加速度计	跑步机	PA分别解释了男性儿童和女性儿童峰值摄氧量变化的0%~8%和0%~2%。

下面介绍的是肺部摄氧量动力学特征。

随着“Breath-by-breath”法的推出,一些创新的生理学家在运动开始时绘制肺部摄氧量动力学反应

的图表^[94],以显示肺部摄氧量动力学有潜力提供一个了解肌肉代谢活动的窗口^[95],并且通过“Breath-by-breath”法与磁共振波谱学的结合,提供一种费用相



对较低的非侵入性方法来研究运动中青少年的肌肉代谢情况^[96]。

Macek 和 Vavra 是最早研究运动开始时儿童瞬态反应半衰期的研究人员,但首次将 Breath-by-breath 法用于青少年肺部摄氧量动力学的是 Cooper 和他的同事^[97]。早期研究中获得的数据是不一致的,但最近的研究通过使用更严格的方法、复杂的数学建模技术和不断发展的技术,开始阐明青少年肺部摄氧量动力学特征。

有研究讨论了肺部摄氧量动力学和肌肉磷酸肌酸动力学在青少年肌肉代谢中的应用以及相关的研究^[63,98]。随着青少年肺部摄氧量动力学的发展,研究人员已经定期综述发表了相关文献^[99-101],且最近还探索了解释青少年肺部摄氧量动力学的潜在机制^[102]。但在本文中,讨论主要针对在青少年有氧能力的背景下肺部摄氧量动力学产生的研究问题,并且由于篇幅限制,将只简要介绍基本背景。

对肺部摄氧量动力学反应应当采用以下测定方法,先施加预定的运动负荷,然后使用非线性回归和迭代拟合过程,并采用符合指定模型的反应数据,返回以 $p\dot{V}O_2$ 表示的指数上升比率和反应幅度。但如果使用一系列模型并且其中采用几个有限的生理原理,会混淆对青少年肺部摄氧量动力学的理解。此外,青少年本身不稳定的呼吸模式会降低肺部换气动力学的信噪比。较大的内呼吸波动会降低估计肺部摄氧量动力学的置信度,并且置信区间很有可能超过了可接受的限度。很少有以儿童为研究对象的研究显示,对主分量时间常数(τ)有可接受的置信区间。有兴趣的读者可以参考 Fawcner 和 Armstrong^[103] 关于在青少年肺部摄氧量动力学测定中采用方法的评论文章。

对于从安静状态(或低强度运动)到高强度运动阶段变化的 $p\dot{V}O_2$ 反应主要有 3 个阶段。第一阶段(心脏动力学阶段),在青少年中会持续 15~20 s,它与摄氧量的上升有关,出现在运动肌肉的静脉血液到达肺部之前,因此独立于 $\dot{V}O_{2max}$ 。在第一阶段后会出现 $p\dot{V}O_2$ 的指数上升(第二阶段),在这个阶段,以中等强度的运动[运动强度低于换气阈值(GET)]推动 $p\dot{V}O_2$ 在 90 s 里达到稳定状态(第三阶段)。对第二阶段用它的时间常数(τ)进行描述,即达到肺部摄氧量变化的 63%所需的时间(因此肺部摄氧量总变化的 98%在 4τ 中出现)。向高强度运动的阶跃变化,即运动强度高于气体交换阈(Gas Exchange Threshold, GET),但低于临界负荷(Critical Power, CP),也显示了第一阶段后的第二阶段 $p\dot{V}O_2$ 指数反应,但

刺激了第三阶段,在这个阶段耗氧量增加,叠加了作为肺部摄氧量的慢循环(Slow Component, SC)的时间,并且在青少年中要延迟大约 10 min 才能达到稳定状态。Gaesser 和 Poole 坚定地认为,根据成年人数据,大约有 85%的肺部摄氧量 SC 源于运动肌肉,这在很大程度上可能是由于随着运动的进行导致肌纤维募集发生变化^[104]。

第三阶段是向超高强度运动的阶跃变化(即:运动强度介于 CP 和 $p\dot{V}O_2$ 之间),它的特点并不是最终的稳定状态,至少在成年人中如此,SC 随着时间上升并且反映了 $p\dot{V}O_2$ 。运动强度增加带来的阶跃变化会导致 $p\dot{V}O_2$ 反应的耗尽,以及缺少可识别的 SC,并且被列为处于高强度运动领域。在这些情况下,青少年大约在 90 s 内会达到峰值摄氧量。

7 运动开始时青少年出现 $p\dot{V}O_2$ 时摄氧动力学反应的第一阶段是否与实足年龄、生物性成熟或性别有关?

在运动开始后,由于肌肉—肺部的传输延迟,使 $p\dot{V}O_2$ 与 $\dot{V}O_{2max}$ 临时分离。反应的速度几乎取决于心输出量(\dot{Q})的瞬时增加,这是由迷走神经的撤离引起的。如果肌肉—肺部的传输延迟是一种生长功能,儿童的运动肌肉和肺部之间的较短距离可能意味着第一阶段的长度会出现与年龄相关的增加。但是第一阶段的数据经常会由于方法学问题出现模糊和混淆。出于对主要成分建模的目的,对第一阶段的持续时间通常不进行测量,只是将其假设为 15~20 s 左右的常数,并且在第二阶段和第三阶段模型中从数据集去除。然而,由于第一阶段在运动开始时与 \dot{Q} 动力学相关,并且与成年人相比,儿童需要 \dot{Q} 的增幅更大才能达到给定的 $p\dot{V}O_2$ ^[3,105],因此看来认为在成长和成熟过程中第一阶段的特性可能会发生变化是合理的。

根据报告,作为对向 50% $p\dot{V}O_2$ 过渡开始的反应,成年男性的第一阶段持续时间比男性儿童更长^[106]。一项对 10~13 岁青少年的纵向研究表明,在 3 次年度测量中,在低强度运动开始时,男性儿童和女性儿童的第一阶段持续时间都有所增加。同一项研究还证实青春期前男性儿童的第一阶段持续时间要短于青春期前的女性儿童。这一研究结果可能表示,在运动开始时,男性儿童的 SV 动力学特征出现的比女性儿童更快,在此之前使用多普勒超声心动图也观察到了这一结果^[27]。

对运动开始时第一阶段的情况以及它是否随着递增负荷运动发生变化的了解很少。第一阶段的实足年龄和性别对其影响以及潜在机制需要进行严格



探索。似乎还没有人研究过第一阶段生物性成熟的独立影响因素,对运动领域第一阶段的持续时间进行进一步的研究是很有必要的。

8 运动开始时低于最大气体交换阈值的青少年 $\dot{V}O_2$ 是否与实足年龄、生物性成熟或性别相关?

对中等强度运动开始时 $\dot{V}O_2$ 的初步研究表明,第二阶段 τ 在儿童时期已经完全成熟,但一些早期研究在方法学上存在缺陷(用于评论文章)^[9],最近得到更好控制的研究表明,男性儿童和女性儿童的主要成分 τ 均分别比成年男性和女性明显更短^[108-110]。在唯一一项将女性儿童纳入研究对象的研究中,Fawkner 等人报告称,尽管在 $\dot{V}O_2$ 中存在显著的性别差异,但是在 τ 中没有发现性别差异^[109]。与从成年人获得的早期数据相反(综述)^[111],他们报告称青少年的 $\dot{V}O_2$ 与第二阶段 τ 无关,并且其他人后来也确认了这一研究结果^[112]。

在运动开始时,第二阶段 τ 较短,对三磷酸腺苷(Adenosine Triphosphate, ATP)再合成做出了更高的有氧贡献,这表明与成年人相比,青少年的有氧能力更强,这可能是由于氧输送效果佳或肌肉对氧的利用更佳的结果。假设主要依赖氧输送的 $\dot{V}O_2$ 与第二阶段 τ 无关,并且没有令人信服的证据表明,在中等强度运动开始时增加氧输送可以加快健康青少年的 $\dot{V}O_2$ 。然而,一项测定 $\dot{V}O_2$ 动力学、心率动力学、脱氧肌红蛋白和血红蛋白(HHb)和估算毛细血管血流量的研究表明,与成年男性相比,青春期前的男性儿童的第二阶段 τ 更短,这一说明得到了 HHb 调节更快和局部血流量更快的支持。这一研究结果表明,在运动开始时低于 GET 的情况下,氧摄取和氧输送对儿童较快的 $\dot{V}O_2$ 都有一定作用^[110]。对于梳理第二阶段 τ 的年龄相关差异的潜在机制,相关证据非常有限。目前,来自女性儿童的可靠数据只限于一项研究,并且还没有说明生物性成熟过程的影响。 $\dot{V}O_2$ 与青少年第二阶段 τ 出现离解,但是对成年人却不是如此,这一点是很有趣的。需要进行更多有针对性的研究,以阐明在青少年中等强度运动开始时 $\dot{V}O_2$ 的反应。

9 运动开始时高于最大气体交换阈值的青少年 $\dot{V}O_2$ 是否与实足年龄、生物性成熟或性别相关?

对于高于 GET 的青少年 $\dot{V}O_2$ 动力学的解决经证明是很有挑战性的。由于青少年潜在运动强度的

范围要低于成年人,因此在各个运动领域中可能进行的运动代谢转换范围会缩小,有一些研究没有对剧烈和超剧烈运动强度做严格的划分,因此混淆了对 $\dot{V}O_2$ 影响的解释。在几项研究中,通过使用次优数量的重复转换、没有报告置信区间、所得数据的不完整,都导致模糊了真正的 $\dot{V}O_2$ 动力学特征^[9]。

虽然数据非常匮乏,但有两项可靠的纵向研究已经证实了在高强度运动开始时,第二阶段 τ 与儿童和青少年的实足年龄呈负相关^[113]。第一项研究表明在 10 岁青春期前男性儿童和青春期前女性儿童的第二阶段 τ 明显比其两年后的自身水平更短。在之后一项只将男性儿童作为研究对象的研究中,研究人员观察到 14 岁青少年的第二阶段 τ 比 16 岁时他们的自身水平更短。同一个研究小组发现,与低于 GET 的运动开始时的研究结果相反,青春期前男性儿童的第二阶段 τ 比青春期前女性儿童更短^[114]。在这 3 项研究的所有测量中(男性儿童测量 7 次,女性儿童测量 4 次),第二阶段 τ 与 $\dot{V}O_2$ 没有显著相关性。

根据早期研究得出结论,在高强度运动中,儿童表现出几乎可以忽略的肺部 $\dot{V}O_2$ SC,并且他们的反应可以一个单指数过程为基础建模,但之后的研究证实在儿童中不存在第三阶段 $\dot{V}O_2$ SC。虽然只有少量数据,但是它们一致表明在青少年中, $\dot{V}O_2$ SC 只贡献了大约 9%~12%的运动结束时 $\dot{V}O_2$,并且随着实足年龄的增加,女性儿童会高于男性儿童^[107,113,114]。对高于 GET 的运动开始时生物性成熟对 $\dot{V}O_2$ 动力学反应的影响尚未进行研究。

在大强度运动负荷下,与成年男性相比,男性儿童的第二阶段 τ 更短并且相对 $\dot{V}O_2$ SC 更小, $\dot{V}O_2$ 与第二阶段 τ 不相关^[108]。似乎没有发表女性儿童的数据,因此在本运动领域中无法说明性别差异。与成年人数据相反,青少年的第三阶段 $\dot{V}O_2$ SC 没有显示反映 $\dot{V}O_2$,但稳定在 $\dot{V}O_2$ 的大约 85%~90%^[115],这可能只是由于儿童和青少年达到力竭更快,更早终止运动的原因,但是还需要通过实证研究证实。

探索性研究在进行高于 GET 的运动前使用了启动运动来提高 \dot{Q} 和肌肉氧化,结果是第二阶段 τ 不变和 $\dot{V}O_2$ SC 幅度降低。这表明高于 GET 的第二阶段 $\dot{V}O_2$ 动力学主要受到内在肌肉代谢因素的限制,并且 $\dot{V}O_2$ SC 对氧输送敏感^[116],这在得出结论前还需要进行验证性研究^[106]。

高强度运动领域的每口连续呼吸的数据仅限于对 9~12 岁男性儿童和成年男性的一项研究,在该研究中,当第一阶段结束时, $\dot{V}O_2$ 可以用一个单指数函数进行描述(即:没有检测 $\dot{V}O_2$ SC),其中没有提



供第二阶段 τ 中的实足年龄相关差异。

对高于 GET 的运动开始时青少年 $p\dot{V}O_2$ 的研究非常稀少,并且在确立随着实足年龄的变化方式前需要进行确认。几乎没有来自女性儿童的数据以及包括生物性成熟阶段估计的研究。经验性证据表明,青少年 $p\dot{V}O_2$ 的潜在机制的理论基础非常有限。很有希望引入一些实验模型,如启动运动、对踏板速率的控制和控制实验环境(如:低氧、高氧)。对 $p\dot{V}O_2$ 动力学、心率动力学、 \dot{Q} 和血液脱氧动力学的同时分析加上肌电图的补充,为研究青少年 $p\dot{V}O_2$ 动力学提供了进一步的见解^[102]。但是必须开发更多的非侵入性和创新研究模型,以梳理和证明在运动领域里实足年龄、生物性成熟以及性别相关机制对 $p\dot{V}O_2$ 动力学的影响。

10 青少年 $p\dot{V}O_2$ 是否可以通过训练来提高?

缩短第二阶段 τ (减少缺氧)或减弱 SC(减少氧耗)的训练干预可以提高运动耐量。成年人的第二阶段 τ 和 SC 已被证明可以对 CIET 和 HIIT 项目产生快速积极的响应,虽然还没有建立最佳训练项目,但是,青少年 $p\dot{V}O_2$ 动力学可训练性的数据很少,并且主要依赖于两个研究小组对受训足球运动员和游泳运动员与未经训练的青少年进行比较的 4 项比较研究^[72]。

Unnithan 和他的同事^[117-118]对在 15 岁时开始中等强度运动的男性和女性足球运动员与未经训练的同龄人进行比较,结果显示足球运动员的第二阶段 τ 更短,由于在接受训练的男性儿童中观察到心率动力学特征和毛细血管血流动力学特征更为明显,但 HHb 是类似的,作者假设认为足球运动员更快的 $p\dot{V}O_2$ 可以归因于氧输送和氧利用的提高。有趣的是,受训的女性儿童表现出了更快的 HHb 表现,尽管没有对氧输送进行预估,Unnithan 等人推测他们较短的第二阶段 τ 是由于肌肉氧利用率的提高,因此认为在 $p\dot{V}O_2$ 对训练的反应中存在性别差异^[118]。

McNarry 和她的同事^[119-120]对比了经过游泳训练和未经训练的青春期前和青春期女性儿童在大强度运动开始时的反应,在手臂屈曲运动中,两个训练组均比未经训练的同龄人表现出了更短的第二阶段 τ ,在功率自行车运动中,经过训练的青春期女性儿童表现出了较短的第二阶段 τ 。在 $p\dot{V}O_2$ SC 的幅度上没有在经过训练和未经训练的女性儿童之间发现差异。基于观察到经过训练的女性儿童的心率动力学特征和 HHb 动力学特征更为明显,McNarry 等人假设她们的第二阶段 τ 较短是由于对肌肉的氧输送

提高和肌肉对氧利用提高的综合结果^[119]。

唯一发表的一项干预研究报告称一个为期 6 周的项目显著缩短了 9 岁青春期前肥胖男性儿童的第二阶段 τ ,但是对正常体重的青春期前男性儿童的第二阶段 τ 却没有显著影响。 $p\dot{V}O_2$ 和 SC 的幅度没有受到训练的影响^[121]。

关于青少年 $p\dot{V}O_2$ 可训练性的知识非常缺乏,并且主要依赖于未经证实的横向数据。需要进行经过良好设计的干预研究,用一系列方法发展和评估训练项目,包括 CIET、HIIT 的变化以及 CIET 和 HIIT 的组合。实足年龄和生物性成熟对第二阶段 τ 以及 SC 变化幅度的影响仍是未知的。对性别差异还没有进行试验。需要利用最近开发的非侵入性方法和技术,以探索在成长和成熟阶段 $p\dot{V}O_2$ 动力学参数可训练性的潜在机制。

11 结论

$p\dot{V}O_2$ 在国际上被公认为青少年有氧能力的最佳单项指标,但是对成长和成熟过程中的定义、术语、方法和解释的协调一直存在争议。由于缺乏明确性,导致对当前青少年有氧能力的讨论、与之前研究者的比较以及与健康相关行为的关系出现了混乱。对青少年有氧能力的独特见解在于 $p\dot{V}O_2$ 动力学对运动方案的反应,但是与 $p\dot{V}O_2$ 相比, $p\dot{V}O_2$ 动力学的严格研究仍然处于襁褓阶段,还需要对运动领域的反应开展更多研究。挑战在于不仅要了解 $p\dot{V}O_2$ 和 $p\dot{V}O_2$ 动力学的反应,还要确定和解释潜在机制以及它们在儿童时期和青春期如何变化。对青少年的可训练性已经不再存在争议,但仍需证明是否存在一个成熟阈值。需要进一步发展和评估用于提高 $p\dot{V}O_2$ 和 $p\dot{V}O_2$ 动力学参数的最佳训练项目。目前尚未确定有氧能力中训练诱导改进的机械基础以及实足年龄、生物性成熟和性别的调节作用。随着复杂的建模技术的发展以及在儿童运动生理学中引入非侵入性方法和技术,为进一步研究阐明青少年有氧能力提供了广阔的前景。

参考文献:

- [1] Armstrong N., McManus A. M. The elite young athlete [M]. Basle, Switzerland: Karger, 2011.
- [2] Armstrong N., van Mechelen W. (Eds.). Oxford textbook of children's sport and exercise medicine [M]. Oxford, UK: Oxford University Press, 2017.
- [3] Bar-Or O., Rowland T. W. Pediatric exercise medicine



- [J]. Champaign, IL: Human Kinetics, 2008.
- [4] Hill A. V., Lupton H. Muscular exercise, lactic acid and the supply and utilization of oxygen[J]. Quarterly Journal of Medicine, 1923, 16:135-171.
- [5] Robinson S. Experimental studies of physical fitness in relation to age[J]. Arbeitsphysiologie, 1938, 10:251-323.
- [6] Morse M., Schlutz F. W., Cassels D. E. Relation of age to physiological responses of the older boy to exercise[J]. Journal of Applied Physiology, 1949, 1:683-709.
- [7] Astrand P. O. Experimental studies of physical working capacity in relation to sex and age[M]. Copenhagen, Denmark: Munksgaard, 1952.
- [8] Armstrong N., Welsman J. R. Assessment and interpretation of aerobic fitness in children and adolescents[J]. Exercise and Sport Sciences Reviews, 1994, 22:435-476.
- [9] Krahenbuhl G. S., Skinner J. S., Kohrt W. M. Developmental aspects of maximal aerobic power in children[J]. Exercise and Sports Sciences Reviews, 1985, 13:503-538.
- [10] Armstrong N., Welsman J., Winsley R. Is peak VO_2 a maximal index of children's aerobic fitness?[J]. International Journal of Sports Medicine, 1996, 17, 356-359.
- [11] Barker A. R., Williams C. A., Jones A. M., et al. Establishing maximal oxygen uptake in young people during a ramp test to exhaustion[J]. British Journal of Sports Medicine, 2011, 45:498-503.
- [12] Welsman J. R., Bywater K., Farr C., et al. Reliability of peak VO_2 and maximal cardiac output assessed using thoracic bioimpedance in children[J]. European Journal of Applied Physiology, 2005, 94:228-234.
- [13] Ratel S., Williams C. A. Neuromuscular fatigue[M]. In N. Armstrong & W. van Mechelen (Eds.), Oxford textbook of children's sport and exercise medicine. Oxford, UK: Oxford University Press, 2017:121-132.
- [14] Robben K. E., Poole D. C., Harms C. A. Maximal oxygen uptake validation in children with expiratory flow limitation[J]. Pediatric Exercise Science, 2013, 25:84-100.
- [15] Potter C. R., Childs D. J., Houghto, W., et al. Breath-to-breath noise in the ventilatory and gas exchange responses of children to exercise[J]. European Journal of Applied Physiology, 1998, 80:118-124.
- [16] Ashish H. N., Bamman M. M., Cerny F. J., et al. The clinical translation gap in health exercise research: A call for disruptive action[J]. Clinical and Translational Science, 2015, 8:67-76.
- [17] Pianosi P. T., Liem R. I., McMurray R. G., et al. Pediatric exercise testing: Value and implications of peak oxygen uptake. Children, 2017, 4:6.
- [18] Boileau R. A., Bonen A., Heyward V. H., et al. Maximal aerobic capacity on the treadmill and bicycle ergometer of boys 11-14 years of age[J]. Journal of Sports Medicine and Physical Fitness, 1977, 17:153-162.
- [19] Armstrong N., McManus A. M. Aerobic fitness[M]. In N. Armstrong & W. van Mechelen (Eds.), Oxford textbook of children's sport and exercise medicine (pp. 161-180). Oxford, UK: Oxford University Press, 2017.
- [20] Armstrong N., van Mechelen W. Are young children fit and active?[M]. In S. Biddle J. Sallis, N. Cavill (Eds.), Young and active. London, UK: Health Education Authority, 1998:69-97.
- [21] Armstrong, N., & Welsman, J. R. Peak oxygen uptake in relation to growth and maturation in 11-17-year-old humans. European Journal of Applied Physiology, 2001, 85, 546-551.
- [22] Armstrong N., Welsman J. R., Nevill, A. M. et al. Modeling growth and maturation changes in peak oxygen uptake in 11-13 yr olds[J]. Journal of Applied Physiology, 1999, 87: 2230-2236.
- [23] Mirwald R. L., Bailey D. A. Maximal aerobic power[M]. London, Ontario, Canada: Sports Dynamics, 1986.
- [24] Sprynarova S., Parizkova J., Bunc S. Relationships between body dimensions and resting and working oxygen consumption in boys aged 11 to 18 years[J]. European Journal of Applied Physiology, 1987, 56:725-736.
- [25] Geithner C. A., Thomis M. A., Vanden Eynde B., et al. Growth in peak aerobic power during adolescence[J]. Medicine & Science in Sports & Exercise, 2004, 36:1616-1624.
- [26] Vinet A., Mandigout S., Nottin S., et al. Influence of body composition, hemoglobin concentration, and cardiac size and function on gender differences in maximal oxygen uptake in prepubertal children[J]. Chest, 2003, 124:1494-1499.
- [27] Rowland T., Goff D., Martel L., et al. Influence of cardiac functional capacity on gender differences in maximal oxygen uptake in children[J]. Chest, 2000, 117:629-635.
- [28] Winsley R. J., Fulford J., Roberts A. C., et al. Sex difference in peak oxygen uptake in prepubertal children[J]. Journal of Science and Medicine in Sport, 2009, 12:647-651.
- [29] McNarry M. A., Farr C., Middlebrooke A., et al. Aerobic function and muscle deoxygenation dynamics during ramp exercise in children[J]. Medicine & Science in Sports & Exercise, 2015, 47:1877-1884.
- [30] Tanner J. M. Fallacy of per-weight and per-surface area standards and their relation to spurious correlation[J]. Journal of Applied Physiology, 1949, 2:1-15.
- [31] Katch V. L., Katch F. I. Use of weight-adjusted oxygen



- uptake scores that avoid spurious correlation[J]. *Research Quarterly*, 1974, 45:447-451.
- [32] Loftin M., Sothorn M., Abe T., et al. Expression of VO₂ peak in children and youth with special reference to allometric scaling[J]. *Sports Medicine*, 2016, 46:1451-1460.
- [33] Welsman J. R., Armstrong N. Statistical techniques for interpreting body size-related exercise performance during growth[J]. *Pediatric Exercise Science*, 2000, 12:112-127.
- [34] Winter E. M. Scaling: Partitioning out differences in size [J]. *Pediatric Exercise Science*, 1992, 4:296-301.
- [35] Welsman J. R., Armstrong N. Interpreting exercise performance data in relation to body size[M]. In N. Armstrong & W. van Mechelen (Eds.), *Paediatric exercise science and medicine*. Oxford, UK: Oxford University Press, 2008:13-28.
- [36] Welsman J. R., Armstrong N., Kirby B. J., et al. Scaling peak VO₂ for differences in body size[J]. *Medicine & Science in Sports&Exercise*, 1996, 28:259-265.
- [37] Fahey T. D., Del Valle-Zuris A., Oehlsen G., et al. Pubertal stage differences in hormonal and hematological responses to maximal exercise in males[J]. *Journal of Applied Physiology*, 1979, 46:823-827.
- [38] Armstrong N., Welsman J. R., Kirby B. J. Peak oxygen uptake and maturation in 12-year-olds[J]. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 1998, 30:165-169.
- [39] Loftin M., Sothorn M., Troscclair L., et al. Scaling VO₂ peak in obese and non-obese girls[J]. *Obesity Research*, 2001, 9:290-296.
- [40] Tolfrey K., Barker A. R., Thom J. M., et al. Scaling of maximal oxygen uptake by lower leg muscle volume in boys and men[J]. *Journal of Applied Physiology*, 2006, 100:1851-1856.
- [41] Graves L. E. F., Nevill A. M., Fowweather L., et al. Scaling of peak oxygen uptake in children. A comparison of body size index models[J]. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 2013, 45:2341-2345.
- [42] Rowland T. W. Evolution of maximal oxygen uptake in children[J]. *Medicine and Sport Science*, 2007, 50:200-209.
- [43] Tomkinson G. R., Olds T. S. Field tests of fitness[M]. In N. Armstrong & W. van Mechelen (Eds.), *Paediatric exercise science and medicine*. Oxford, UK: Oxford University Press, 2008:109-128.
- [44] Tomkinson G. R., Lang J. J., Tremblay M., et al. International normative 20 m shuttle run values from 1,142,026 children and youth representing 50 countries[J]. *British Journal of Sports Medicine*. Advance online publication, 2016.
- [45] Tomkinson G. R., Olds T. S. (Eds.). *Pediatric fitness. Secular trends and geographic variability*. Basle, Switzerland: Karger, 2007.
- [46] Shearer L. G., Cumming S. P. Physical activity, physical fitness, and health[M]. In N. Armstrong & W. van Mechelen (Eds.), *Oxford textbook of children's sport and exercisemedicine*. Oxford, UK: Oxford University Press, 2017:225-238.
- [47] Bell R. D., Macek M., Rutenfranz J., et al. Health indicators and risk factors of cardiovascular diseases during childhood and adolescence[M]. In J. Rutenfranz, R. Moccellini, & F. Klimt (Eds.), *Children and exercise*. Champaign, IL: Human Kinetics, 1986:19-27.
- [48] Adegboye A. R., Andersen S. A., Froberg K., et al. Recommended aerobic fitness level for metabolic health in children and adolescents: A study of diagnostic accuracy [J]. *British Journal of Sports Medicine*, 2011, 45:722-728.
- [49] Armstrong N., Balding J., Gentle P., et al. Peak oxygen uptake and physical activity in 11 to 16 year olds[J]. *Pediatric Exercise Science*, 1990, 2:349-358.
- [50] Armstrong N., Kirby B. J., McManus A. M., et al. Aerobic fitness of pre-pubescent children[J]. *Annals of Human Biology*, 1995, 22:427-441.
- [51] McManus A. M., Armstrong N., Williams C. A. Effect of training on the aerobic power and anaerobic performance of prepubertal girls[J]. *Acta Paediatrica*, 1997, 86:456-459.
- [52] Mountjoy M., Andersen L. B., Armstrong N., et al. International Olympic Committee consensus statement on health and fitness of young people through physical activity and sport[J]. *British Journal of Sports Medicine*, 2011, 45:839-848.
- [53] Armstrong N., Tomkinson G. R., Ekelund U. Aerobic fitness and its relationship to sport, exercise training and habitual physical activity during youth[J]. *British Journal of Sports Medicine*, 2011, 45:849-858.
- [54] Eisenmann J. C., Malina R. M. Secular trend in peak oxygen consumption among United States youth in the 20th century[J]. *American Journal of Human Biology*, 2002, 14: 699-706.
- [55] Freedson P. S., Goodman T. L. Measurement of oxygen consumption[M]. In T. W. Rowland (Ed.), *Pediatric laboratory exercise testing*. Champaign, IL: Human Kinetics, 1993: 91-114.
- [56] Armstrong N., Barker A. R. Endurance training and elite young athletes[J]. *Medicine and Sport Science*, 2011, 56: 84-96.
- [57] Tomkinson G. R., Leger L., Olds T. S., et al. Secular



- trends in the performance of children and adolescents (1980-2000) [J]. *Sports Medicine*, 2003, 33:285-300.
- [58] Tomkinson G. R., Olds T. S. Secular changes in aerobic fitness test performance of Australasian children and adolescents[J]. *Medicine and Sport Science*, 2007, 50:168-182.
- [59] Olds T. S., Dolman J. Are changes in distance run performance of Australian children between 1985 and 1997 explained by changes in fatness?[J]. *Pediatric Exercise Science*, 2004, 16:201-209.
- [60] Olds T. S., Ridley K., Tomkinson G. R. Declines in aerobic fitness: Are they only due to increasing fatness?[J]. *Medicine and Sport Science*, 2007, 50:226-240.
- [61] Mayorga-Vega D., Aguiler-Soto P., Viciano J. Criterion-related validity of the 20-m shuttle run test for estimating cardiorespiratory fitness: A meta-analysis[J]. *Journal of Sports Science and Medicine*, 2015, 14:536-547.
- [62] Harrison C. B., Gill N. D., Kinugasa T., et al. Development of aerobic fitness in young team sport athletes[J]. *Sports Medicine*, 2015, 45:969-983.
- [63] Armstrong N., Barker A. R., McManus A. M. Muscle metabolism during exercise[M]. In N. Armstrong & W. van Mechelen (Eds.), *Oxford textbook of children's sport and exercise medicine*. Oxford, UK: Oxford University Press, 2017:70-87.
- [64] Pfeiffer K. A., Lobelo F., Ward D. S., et al. Endurance trainability of children and youth[M]. In H. Hebestreit & O. Bar-Or (Eds.), *The young athlete*. Oxford, UK: Blackwell, 2008:84-95.
- [65] Wackerhage H., Smith J., Wisniewski D. Molecular exercise physiology[M]. In N. Armstrong & W. van Mechelen (Eds.), *Oxford textbook of children's sport and exercise medicine*. Oxford, UK: Oxford University Press, 2017:430-440.
- [66] Mahon A. D. Aerobic training[M]. In N. Armstrong & W. van Mechelen (Eds.), *Paediatric exercise science and medicine*. Oxford, UK: Oxford University Press, 2008: 513-529.
- [67] Savage M. P., Petratis M. M., Thomson W. H., et al. Exercise training effects on serum lipids in prepubescent boys and adult men[J]. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 1986, 18:197-204.
- [68] Eisenmann P. A., Golding L. A. Comparison of effects of training on VO_2 max in girls and young women[J]. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 1975, 7:136-138.
- [69] Gilliam T. B., Freedson P. Effects of a 12 week school physical education program on peak VO_2 , body composition and blood lipids in 7 to 9 year old children[J]. *International Journal of Sports Medicine*, 1980, 1:73-78.
- [70] Rowland T. W. The 'trigger hypothesis' for aerobic trainability: A 14-year follow-up[J]. *Pediatric Exercise Science*, 1997, 9:1-9.
- [71] McNarry M., Jones A. M. The influence of training status on the aerobic and anaerobic responses to exercise in children[J]. *European Journal of Sport Science*, 2014, 14 (1):557-568.
- [72] McNarry M. A., Armstrong N. Aerobic trainability[M]. In N. Armstrong & W. van Mechelen (Eds.), *Oxford textbook of children's sport and exercise medicine*. Oxford, UK: Oxford University Press, 2017:465-476.
- [73] McNarry M. A., Mackintosh K. A., Stoedefalke K. Longitudinal investigation of training status and cardiopulmonary responses in pre- and early-pubertal children[J]. *European Journal of Applied Physiology*, 2014, 114:1573-1580.
- [74] Gist N. H., Fedewa M. V., Dishman R. K., et al. Sprint interval training effects on aerobic capacity: A systematic review and meta-analysis[J]. *Sports Medicine*, 2014, 44:269-279.
- [75] Tolfrey K., Smallwood J. W. High-intensity interval training[M]. In N. Armstrong & W. van Mechelen (Eds.), *Oxford textbook of children's sport and exercise medicine*. Oxford, UK: Oxford University Press, 2017:479-491.
- [76] Costigan S. A., Eather N., Plotnikoff R. C., et al. High-intensity interval training for improving health-related fitness in adolescents: A systematic review and meta-analysis[J]. *British Journal of Sports Medicine*, 2015, 49: 1253-1261.
- [77] Gibala M. J., McGhee S. L. Metabolic adaptations to short-term high-intensity interval training: A little pain for a lot of gain?[J]. *Exercise and Sport Sciences Reviews*, 2008, 36:58-63.
- [78] Hildebrand M., Ekelund U. Assessment of physical activity[M]. In N. Armstrong & W. van Mechelen (Eds.), *Oxford textbook of children's sport and exercise medicine*. Oxford, UK: Oxford University Press, 2017:303-314.
- [79] Schutte N. M., Bartels M., de Gues E. J. C. Genetics of physical activity and physical fitness[M]. In N. Armstrong & W. van Mechelen (Eds.), *Oxford textbook of children's sport and exercise medicine*. Oxford, UK: Oxford University Press, 2017:293-302.
- [80] Seliger V., Trefny S., Bartenkova S., et al. The habitual physical activity and fitness of 12 year old boys[J]. *Acta Paediatrica Belgica*, 1974, 28:54-59.
- [81] Armstrong N., Fawkner S. G. Aerobic fitness[M]. In N.



- Armstrong (Ed.), Paediatric exercise physiology. Edinburgh, Scotland: Churchill Livingstone, 2007:161-187.
- [82] Armstrong N. Physical fitness and physical activity during childhood and adolescence[M]. In K. M. Chan & L. Micheli (Eds.), Sports and children. Hong Kong, Special Administrative Region of the People's Republic of China: Williams & Wilkins, 1998:50-75.
- [83] Morrow J. R., Freedson P. S. The relationship between habitual physical activity and aerobic fitness in adolescents[J]. *Pediatric Exercise Science*, 1994, 6:315-329.
- [84] Armstrong N., Welsman J. R., Kirby B. J. Longitudinal changes in 11-13-year-olds' physical activity[J]. *Acta Paediatrica*, 2000, 89:775-780.
- [85] Kemper H. C. G., Koppes L. L. J. Is physical activity important for aerobic power in young males and females? [J]. *Medicine and Sport Science*, 2004, 47:153-166.
- [86] Ekelund U., Tomkinson G. R., Armstrong N. What proportion of youth are physically active? Measurement issues, levels and recent time trends[J]. *British Journal of Sports Medicine*, 2011, 45:859-866.
- [87] Armstrong N., McManus A. M., Welsman J. R., et al. Physical activity patterns and aerobic fitness among pre-pubescents[J]. *European Physical Education Review*, 1996, 2:7-18.
- [88] Armstrong N., Welsman J., Kirby B. J. Physical activity, peak oxygen uptake and performance on the Wingate Anaerobic Test in 12-year-olds[J]. *Acta Kinesiologicae Universitatis Tartuensis*, 1998, 3:7-21.
- [89] Ekelund U., Poortvleit E., Nilsson A., et al. Physical activity in relation to aerobic fitness and body fat in 14-to-15 year-old boys and girls[J]. *European Journal of Applied Physiology*, 2001, 85:195-201.
- [90] Eiberg S., Hasselstrom H., Gronfeldt K., et al. Maximum oxygen uptake and objectively measured physical activity in Danish children 6-7 years of age: the Copenhagen school child intervention study [J]. *British Journal of Sports Medicine*, 2005, 39:725-730.
- [91] Dencker M., Thorsson O., Karlsson M. K., et al. Daily physical activity and its relation to aerobic fitness in children aged 8-11 years[J]. *European Journal of Applied Physiology*, 2006, 96:587-592.
- [92] Butte N. F., Puyau M. R., Adolph A. L., et al. Physical activity in non-overweight and overweight Hispanic children and adolescents[J]. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 2007, 39:1257-1266.
- [93] Dencker M., Bugge A., Hermansen B., et al. (2010). Objectively measured daily physical activity related to aerobic fitness in young children[J]. *Journal of Sports Sciences*, 28, 139-145.
- [94] Whipp B. J., Ward S. A., Lamarra N., et al. Parameters of ventilatory and gas exchange dynamics during exercise [J]. *Journal of Applied Physiology*, 1982, 52:1506-1513.
- [95] Grassi B., Poole D. C., Richardson R. S., et al. Muscle VO₂ kinetics in humans: Implications for metabolic control[J]. *Journal of Applied Physiology*, 1996, 80:988-998.
- [96] Rossiter H. B., Ward S. A., Doyle V. L., et al. Inferences from pulmonary O₂ uptake with respect to intramuscular [phosphocreatine] kinetics during moderate exercise in humans[J]. *Journal of Physiology*, 1999, 518:921-932.
- [97] Cooper D.M., Berry C., Lamarra N., et al. Kinetics of oxygen uptake and heart rate at onset of exercise in children[J]. *Journal of Applied Physiology*, 1985, 59:211-217.
- [98] Barker A. R., Armstrong N. Insights into developmental muscle metabolism through the use of ³¹P-magnetic resonance spectroscopy[J]. *Pediatric Exercise Science*, 2010, 22:350-368.
- [99] Armstrong N., Barker A. R. Oxygen uptake kinetics in children and adolescents[J]. *Pediatric Exercise Science*, 2009, 21:130-147.
- [100] Barstow T. J., Scheuermann B. W. VO₂ kinetics: Effects of maturation and ageing[M]. In A. M. Jones & D. C. Poole (Eds.), *Oxygen uptake kinetics in sport, exercise and medicine*. Oxford, UK: Routledge, 2005:331-352.
- [101] Fawcner S. G., Armstrong N. Oxygen uptake kinetic response to exercise in children[J]. *Sports Medicine*, 2003, 33:651-669.
- [102] Barker A. R., Armstrong N. Pulmonary oxygen uptake kinetics. In N. Armstrong & W. van Mechelen (Eds.), *Oxford textbook of children's sport and exercise medicine* [M]. Oxford, UK: Oxford University Press, 2017:181-194.
- [103] Fawcner S. G., Armstrong N. Can we confidently study VO₂ kinetics in young people?[J]. *Journal of Sports Science and Medicine*, 2007, 6:277-285.
- [104] Gaesser G. A., Poole D. C. The slow component of oxygen uptake kinetics in humans[J]. *Exercise and Sport Science Reviews*, 1994, 24:35-71.
- [105] Turley K. R., Wilmore J. H. Cardiovascular responses to treadmill and cycle ergometer exercise in children and adults[J]. *Journal of Applied Physiology*, 1997, 83:948-957.
- [106] Hebestreit H., Kriemler S., Hughson R. L., et al. Kinetics of oxygen uptake at the onset of exercise in boys and men[J]. *Journal of Applied Physiology*, 1998, 85:1833-1841.



- [107]Fawcner S. G., Armstrong N. Longitudinal changes in the kinetic response to heavy-intensity exercise in children[J]. *Journal of Applied Physiology*, 2004, 97:460-466.
- [108]Breese B. C., Barker A. R., Armstrong N., et al. Effect of baseline metabolic rate on pulmonary O₂ uptake kinetics during very heavy intensity exercise in boys and men[J]. *Respiratory Physiology and Neurobiology*, 2012, 180:223-229.
- [109]Fawcner S. G., Armstrong N., Potter C. R., et al. Oxygen uptake kinetics in children and adults after the onset of moderate intensity exercise[J]. *Journal of Sports Sciences*, 2002, 20:319-326.
- [110]Leclair E., Berthion S., Borel B., et al. Faster pulmonary oxygen uptake kinetics in children vs adults due to enhancements in oxygen delivery and extraction[J]. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*, 2013, 23:705-712.
- [111]Poole D. C., Jones A. M. Oxygen uptake kinetics[J]. *Comparative Physiology*, 2012, 2:933-996.
- [112]Cleuziou C., Lecoq A. M., Candau R., et al. Kinetics of oxygen uptake at the onset of moderate and heavy exercise in trained and untrained prepubertal children[J]. *Science and Sport*, 2002, 17:291-296.
- [113]Breese B. C., Williams C. A., Welsman J. R., et al. Longitudinal changes in the oxygen uptake kinetic response to heavy intensity exercise in 14-16-year-old boys [J]. *Pediatric Exercise Science*, 2010, 22:314-325.
- [114]Fawcner S. G., Armstrong N. Sex differences in the oxygen uptake kinetic response to heavy-intensity exercise in prepubertal children[J]. *European Journal of Applied Physiology*, 2004, 93:210-216.
- [115]Barker A. R., Bond B., Toman C., et al. Critical power in adolescents: Physiological bases and assessment using all-out exercise[J]. *European Journal of Applied Physiology*, 2012, 112:1359-1370.
- [116]Barker A. R., Jones A. M., Armstrong N. The influence of priming exercise on oxygen uptake, cardiac output, and muscle oxygenation kinetics during very heavy intensity exercise in 9-13-year-old boys[J]. *Journal of Applied Physiology*, 2010, 109:491-500.
- [117]Marwood S., Roche D., Rowland T. W., et al. Faster pulmonary oxygen uptake kinetics in trained versus untrained male adolescents[J]. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 2010, 42:127-134.
- [118]Unnithan V., Roche D., Garrard M., et al. Oxygen uptake kinetics in trained adolescent females[J]. *European Journal of Applied Physiology*, 2015, 115:213-220.
- [119]McNarry M. A., Welsman J. R., Jones A. M. Influence of training status and exercise modality on pulmonary O₂ uptake kinetics in pubertal girls[J]. *European Journal of Applied Physiology*, 2010, 111:621-631.
- [120]Winlove M. A., Jones A. M., Welsman J. R. Influence of training status and exercise modality on pulmonary O₂ uptake kinetics in pre-pubertal girls[J]. *European Journal of Applied Physiology*, 2010, 108:1169-1179.
- [121]McNarry M. A., Lambrick D., Westrupp N., et al. The influence of a six-week, high-intensity games intervention on the pulmonary oxygen uptake kinetics in prepubertal obese and normal-weight children[J]. *Applied Physiology Nutrition and Metabolism*, 2015, 40:1012-1018.
- [122]Armstrong N. (2012). Young people are fit and active-Factor fiction? [J]. *Journal of Sport and Health Sciences*, 1:131-140.
- [123]Armstrong N., Williams J., Balding J., et al. (1991). The peak oxygen uptake of British children with reference to age, sex and sexual maturity[J]. *European Journal of Applied Physiology*, 62:369-375.
- [124]The Cooper Institute for Aerobics Research. (2004). *Fitnessgram test administration manual (3rd ed.)*[M]. Champaign, IL: Human Kinetics.
- [125]Dencker M., Bugge A., Hermansen B., et al. (2010). Objectively measured daily physical activity related to aerobic fitness in young children[J]. *Journal of Sports Sciences*, 28, 139-145.
- [126]Katch V. L. (1983). Physical conditioning of children[J]. *Journal of Adolescent Health Care*, 3:241-246.
- [127]Macek M., Vavra J. (1980). The adjustment of oxygen uptake at the onset of exercise: A comparison between prepubertal boys and young adults[J]. *International Journal of Sports Medicine*, 1:70-72.
- [128]McManus A. M., Armstrong N. (in press). Maximal oxygen uptake[M]. In T. W. Rowland (Ed.), *Cardiopulmonary exercise testing in children and adolescents*. Champaign, IL: Human Kinetics.
- [129]Rowland, T. W. (2005). *Children's exercise physiology*. Champaign, IL: Human Kinetics.

(本文译自: *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 2017, VOL. 88, NO. 2, 130-148)

(责任编辑:何聪)