体 育 科 学
CHINA SPORT SCIENCE
2022年（第42卷）第7期
Vol. 42,No.7,51-61,2022
文章编号:1000-677X(2022)07-0051-11
DOI:10.16469/j.css.202207005

青春期前青少年有氧能力训练：可训练性、训练适应机制和实际应用

陈依依[1,2]，李丹阳[2*]，倪丽丽[1,2]

（1. 武汉体育学院 研究生院，湖北 武汉 430079；2. 武汉体育学院 体能中心，湖北 武汉 430079）

摘　要：有氧能力是反映青少年身体健康水平和运动能力的重要指标。受青少年体能训练“敏感期”理论的影响，人们对青春期前的青少年有氧能力的可训练性、训练机制、影响因素及有效训练计划等方面产生了诸多争议，一定程度上制约了青少年有氧能力训练的科学化发展。基于现有研究成果，客观总结了青春期前青少年有氧能力训练的研究进展，得出以下主要结论：1）青春期前的青少年可通过科学化的训练提升有氧能力；2）青春期前青少年有氧能力提高的生理学机制主要为：每搏输出量增加、氧运输和氧利用能力增加，以及肌肉代谢、氧化能力增强；3）青少年有氧能力的发展受生长和发育的影响，如实际年龄（以下简称“年龄”）、成熟度，但青少年有氧能力的可训练性与之无关，而与初始体能水平呈负相关；4）高强度间歇训练是提升青春期前青少年有氧能力的一种经济且高效的训练方法；5）青春期前青少年有氧能力训练的经典模式为：大肌肉群参与的持续和间歇运动，85%～90%HR_{max}，3～4次/周，40～60 min/次，最少持续12周，其中训练强度是影响训练效应的决定性因素。

关键词：青春期前；青少年；有氧能力；摄氧量动力学；可训练性

中图分类号：G808.1　　**文献标识码**：A

有氧能力也称为心肺耐力或心肺适能，指机体输送氧气及肌肉组织通过有氧代谢提供能量以维持自身活动的能力，可综合反映机体摄取、运输和利用氧的能力，它与心血管系统运输氧气、呼吸系统通气换气功能，以及骨骼肌等外周组织利用氧的能力有关（Armstrong et al.，2017），是机体持久工作的基础。

研究表明，青少年较低的心肺适能与成年后全因死亡率显著相关（Tomkinson et al.，2019）。有氧能力作为心血管疾病、糖尿病、癌症和心理健康的强预测因子（Ruiz et al.，2009），是评价青少年身体健康的一项重要机能指标（Ortega et al.，2008）。此外，有氧能力也是青少年在许多运动项目（如中长跑、游泳和自行车等耐力性项目，篮球和足球等集体球类项目）中取得成功的决定因素（Armstrong et al.，2011b）。青少年拥有良好的有氧能力，可减少运动中的血乳酸堆积，延迟运动性疲劳的出现，从而延长机体的工作能力。

受青少年体能训练“敏感期”理论的影响，早期研究提出的“成熟阈值、触发假说”理论认为，对青春期前的青少年实施有氧能力训练，诱发的训练效应极小甚至没有效应（Gilliam et al.，1980；Katch，1983）。这导致人们对青春期前的青少年有氧能力训练不重视，进而限制了青少年有氧能力训练的发展。随着对青少年有氧能力研究的不断深入，学者们基于循证实践逐步形成了较为一致的观点：青少年的有氧能力在整个发育阶段（青春期前和青春期）均具有较强的可训练性（Armstrong，2017a；Baquet et al.，2003；Barker et al.，2014）。因此，本文通过对当前国际上青少年有氧能力相关的研究成果进行综述，明确青春期前青少年有氧能力的可训练性、分析其生理机制及影响因素，进而归纳基于循证的青少年有氧能力训练指南，为我国青少年有氧能力训练科学化及体能训练体系化建设提供理论支持。

基于国际权威研究对青春期的定义，本文对青春期前青少年的界定为：年龄小于13岁且没有进入青春期状态的人群（Armstrong et al.，2017；Baquet et al.，2003；Harrison et al.，2015）。

收稿日期：2021-04-02；**修订日期**：2022-04-20
基金项目：国家重点研发计划“科技冬奥”专项（2018YFF0300904）。
第一作者简介：陈依依（1997-），女，在读硕士研究生，主要研究方向为青少年体能训练的理论与实践，E-mail：1836104233@qq.com。
***通信作者简介**：李丹阳（1982-），男，副教授，博士，主要研究方向为精英运动员与青少年体能训练，E-mail：ldyeee@hotmail.com。

1 青春期前青少年有氧能力的可训练性

青春期前青少年有氧能力的可训练性主要反映在峰值摄氧量（peak oxygen uptake，$\dot{V}O_{2peak}$）、摄氧量动力学、乳酸阈值（lactate threshold，LT）和通气阈值（ventilatory threshold，VT），以及跑步经济性这几个方面。常用最大摄氧量（maximum oxygen uptake，$\dot{V}O_{2max}$）评估机体的有氧能力，然而有些青少年难以达到机体的最大摄氧量，因此将递增运动测试中力竭状态下的 $\dot{V}O_{2peak}$ 作为评估青少年有氧能力的“黄金指标”（Armstrong，2017b；Harrison et al.，2015）。此外，摄氧量动力学、LT、VT 以及运动经济性也作为评估机体有氧能力的重要指标（Whipp，1980）。

早期研究认为，青春期前的青少年因生理机能（神经肌肉系统、神经激素水平）发育尚未成熟，对其进行有氧能力训练无法产生训练效应或效应很小（Katch，1983）。如 Kobayashi 等（1978）对 9～16 岁男孩进行耐力训练后，发现男孩在生长速度高峰（peak height velocity，PHV）之前 $\dot{V}O_{2max}$ 增长缓慢，而进入 PHV 后，男孩 $\dot{V}O_{2max}$ 的增长速率加快。Gilliam 等（1980）对 7～9 岁的青春期前青少年实施 12 周、4 次/周、25 min/次的中强度有氧训练，发现训练后的 $\dot{V}O_{2peak}$ 无显著变化。

随着实验方法和测试手段的提高，越来越多的研究发现，青春期前的青少年经耐力训练后有氧能力（$\dot{V}O_{2peak}$、摄氧量动力学、LT 和 VT）有明显改善。Mcmanus 等（1997，2005 分别对 9 岁女孩和 9 岁男孩实施 8 周的持续骑行和间歇冲刺训练，发现两实验组的 $\dot{V}O_{2peak}$ 均大幅提高。类似的，Baquet 等（2010）对 8～11 岁青春期前青少年的有氧能力研究发现，7 周训练后实验组的 $\dot{V}O_{2peak}$ 显著增加（持续组增加 7.0%，间歇组增加 4.8%）。值得注意的是，早期有研究表明，实施相同的训练方案后，青春期前（Savage et al.，1986）和青春期（Eisenman et al.，1975）的青少年 $\dot{V}O_{2max}$ 提升的幅度与成人相比没有显著差异。但随后有研究对青春期前青少年与成人相同的训练效应提出质疑，认为由于青春期前青少年有氧能力基线值较高（Dotan，2018），血浆容量、睾酮、生长激素较低等因素（Rowland，1997）导致有氧能力的训练效应低于成人。然而这一结论源于将不同的研究进行横向比较得出，不同研究方案中关键因素（如训练方案、训练经验不同）的显著差异可能会导致简单对比所获得的结论缺乏说服力。

摄氧量动力学分为阶段 I、阶段 II 和阶段 III 3 个阶段。阶段 II 的时间常数（τ）和阶段 III 的摄氧量慢成分（SC）均反映了运动开始时机体摄氧量的动员速率，τ 越快、SC 越小则摄氧量动员越迅速，也就意味着人体在运动中产生的氧亏越少，无氧代谢比例越低（Poole et al.，2012）。因此，通过缩短阶段 II 的 τ 和减小阶段 III 的 SC 可改善摄氧量动力学特征，提高机体的有氧能力。由于方法学上的缺陷（如错误以 $\dot{V}O_{2peak}$ 百分比指标作为强度范围，以及训练方案和测试模式不一致等），使得早期的研究认为，训练对青春期前青少年的摄氧量动力学（τ 和 SC）无显著影响（Cleuziou et al.，2002；Obert et al.，2000）。然而，近年来的研究弥补了方法上的缺陷，将这些因素考虑在内，发现通过训练可以改善青春期前青少年的摄氧量动力学。如 McNarry 等（2015）研究了 6 周高强度间歇训练（high-intensity interval training，HIIT）对 9～10 岁青春期前肥胖和正常体质量男孩摄氧量动力学的影响，发现训练后肥胖男孩的摄氧量动力学显著改善，表现为 τ 加快，但其 $\dot{V}O_{2peak}$ 和 SC 没有变化；而正常体质量男孩的 $\dot{V}O_{2peak}$、τ 和 SC 均无显著变化。因此 McNarry 认为，摄氧量动力学阶段 II 的 τ 与 $\dot{V}O_{2peak}$ 无相关性，且将训练后正常体质量青少年的有氧能力未发生改善归因于受试者的有氧能力基线值较高。Winlove 等（2010）比较了训练状态（有游泳训练经历和无游泳训练经历）和测试模式（下肢功率自行车和手摇功率仪）对 10～12 岁青春期前女孩摄氧量动力学的影响，发现使用下肢功率自行车测试时，两组 τ 没有显著差异，而在手摇功率仪测试中（游泳是一项上肢占主导的项目），有训练经历女孩的 τ 和心率动力学明显快于无训练经历的女孩。因此，通过训练可以改善青少年的摄氧量动力学特征，且摄氧量动力学改善的幅度与训练测试的一致性、受试者的有氧能力基线值高低均有关系。

减少运动产生的血乳酸，可延迟运动性疲劳的出现，从而延长机体的工作能力。虽然针对青春期前青少年 LT 和 VT 的前瞻性研究较少，但仍有研究表明，在一定强度的运动训练后，青春期前青少年的 LT 和 VT 提高。早期研究发现，训练后青春期前青少年的血乳酸堆积（blood lactate accumulation，BLA）减少、LT 提高（Danis et al.，2003；Welsman et al.，1997）。McManus 等（2005）将 35 名 9～11 岁青春期前男孩分为高强度间歇训练组、中强度持续训练组以及对照组，发现 8 周训练结束后，两训练组的 $\dot{V}O_{2peak}$ 均显著增加，但只在高强度间歇训练组发现 VT 显著提高。类似的，Mucci 等（2013）研究了 8 周 HIIT 对 9～11 岁青春期前男孩和女孩心肺功能的影响，发现训练后不仅 $\dot{V}O_{2peak}$ 显著增加，VT 也显著提高。综上，青春期前青少年可通过适宜训练减少 BLA、提高 VT，且 HIIT 可作为改善青春期前青少年 VT 的有效训练方法。

运动经济性是指在给定的绝对运动强度下所需的耗氧量，该概念可应用于一系列具有绝对运动强度的运动（如跑步、游泳和骑自行车）（Armstrong et al.，2017）。目前，关于青春期前青少年运动经济性可训练性的研究较少，且主要集中在跑步经济性（running economy，RE），由于方法学的限制（如运动模式单一、训练时间不足等），支持短期或长期训练能改善青春期前青少年跑步经济性的证据尚不充分。有研究发现，未受过训练的青春期前青少年经短期耐力训练后，RE 没有变化（Lussier et al.，1977；

Petray et al.，1985）。然而，Daniels等（1971）发现青春期前和青春期的男性青少年（10～15岁）经22个月的跑步训练后，青春期前和青春期青少年的RE均显著改善，RE的改善似乎很大程度上归因于生长的作用，而不是训练，但Daniels等并没有否定训练的作用。随后，一项关于青春期前和青春期青少年RE的综述表明，短期内（2～3个月）的跑步训练对青春期前青少年和青春期青少年的RE几乎无改善作用，而长期（几年）的跑步训练显著改善RE（Krahenbuhl et al.，1992）。因此，想要改善青春期前青少年的RE，可能需要实施长期的运动干预。

综上所述，对青春期前青少年实施科学的训练后，其有氧能力（$\dot{V}O_{2peak}$、摄氧量动力学、LT和VT）能得到显著改善。且有研究发现，当对青春期前和青春期的青少年实施与成人相同的耐力训练方案后，会诱发青少年与成人相似的有氧能力训练效应（Eisenman et al.，1975；Savage et al.，1986），说明在一定条件下，不同成熟阶段青少年的有氧能力训练效应与成人相似。由于这方面的研究较少，后期需要更多的研究去验证青春期前青少年的有氧能力训练效应与成人是否存在差异。

2 青春期前青少年有氧能力训练的机制

2.1 $\dot{V}O_{2peak}$

根据Fick方程，$\dot{V}O_{2peak}$是心输出量和动静脉氧差的乘积，心输出量是每搏输出量（stroke volume，SV）与心率（heart rate，HR）的乘积。成人训练后$\dot{V}O_{2peak}$增加与中枢和外周心血管适应有关，表现为SV和动静脉氧差的共同增加（Weltman et al.，1992）。研究分析，青春期前青少年耐力训练后的最大动静脉氧差和HR_{max}没有变化，$\dot{V}O_{2peak}$的增加主要归因于SV_{max}提高，从而增加了心输出量（Armstrong，2019b；Eriksson et al.，1973）。Nottin等（2002）比较了有耐力训练经历和无耐力训练经历的青春期前青少年在静息和最大摄氧量测试中中枢和外周心血管反应，结果发现，受过训练的青春期前青少年其$\dot{V}O_{2peak}$明显高于未受过训练的同龄人，研究认为，SV_{max}是训练诱发$\dot{V}O_{2peak}$改善的唯一生理因素；Nottin等（2002）还发现，受过训练的青春期前青少年呈现较大的SV_{max}与影响静息SV的因素（如心肌肥大、心肌舒张功能或血容量增加等）有关。Obert等（2003）研究了13周耐力训练（3次/周，＞80%HR_{max}）对10～11岁青春期前青少年心血管反应的影响，发现训练后$\dot{V}O_{2peak}$显著增加是由于SV_{max}的增加（表现为左心室舒张末期容积增加、舒张功能改善和外周血管阻力减小）。

2.2 摄氧量动力学

关于青春期前青少年训练后SV增加机制的研究较少，且存在争议。有学者将青春期前青少年训练后SV增加归因于功能适应（血容量增加和舒张功能改善）（Nottin et al.，2002；Wilpsbäumer et al.，1998）。也有学者将青春期前青少年经耐力训练后SV增加归因于左心室维度、质量增加的形态适应（Rowland et al.，2009）。综上，虽然SV增加的具体机制有待阐明，但当前的研究表明，青春期前青少年经训练后诱导$\dot{V}O_{2peak}$增加主要是通过增加SV_{max}增强运输氧到肌肉的能力。

摄氧量从安静或无负荷运动状态进入指定强度运动状态，以及机体达到适应这一特定强度运动的稳态被称为摄氧量动力学，是反映机体从运动开始到进入稳定工作状态所摄取氧气的动态变化过程。不同强度的运动，摄氧量动力学呈现出不同的阶段特征（Whipp et al.，1972）。摄氧量动力学分为3个阶段（阶段I、阶段II、阶段III）和4个运动强度范围（中等强度、高强度、非常高强度、极高强度；图1）。对青春期前的青少年而言，一般使用中强度和高强度运动（Armstrong et al.，2009；Mcnarry，2019）。

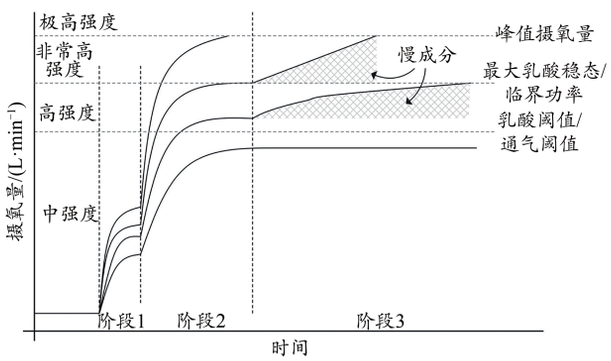

图1 运动强度阶段变化的摄氧动力学反应（Armstrong et al.，2017）

Figure 1. Oxygen Uptake Kinetics in Response to the Different Stage of Exercise Intensity（Armstrong et al.，2017）

注：中强度：低于乳酸阈值/通气阈值；高强度：高于乳酸阈值/通气阈值但低于最大乳酸稳态/临界功；非常高强度：高于临界功率；极高强度：高于峰值摄氧量。

在成人中，训练诱导阶段II τ的改善机制包括氧化酶活性增强、肌肉血流加快以及氧运输与氧利用的平衡；阶段III SC的减小是由于肌肉氧运输能力增强、肌纤维募集方式改变以及肌肉氧化能力增加（Poole et al.，2012）。有少量研究探索了训练改善青春期前青少年摄氧量动力学的机制。例如，Winlove等（2010）观察了有训练经历和无训练经历的青春期前女孩在高强度运动过程中的摄氧量动力学特征，发现受过训练的女孩有较高的氧利用能力，因此认为训练提高了氧利用能力，从而加快了摄氧量动力学。McNarry等（2012）研究了训练状态与成熟度对青春期前和青春期女孩摄氧量动力学的影响，发现与未受训练的青春期前和青春期女孩相比，受过训练的女孩其摄氧量动力学明显较快，且训练状态的差异不受成熟度的影响，认为受过训练女孩的肌肉氧化酶活性增强，加快了摄氧量动力学的时间常数τ。McNarry等（2015）对青春

期前青少年实施了6周高强度训练，发现训练后摄氧量动力学改善是由于氧运输和氧利用能力增强、肌肉代谢增强（高强度训练增加了肌肉氧化酶活性）。因此，从目前的研究来看，青春期前青少年训练后摄氧量动力学改善的主要机制是氧气输送和氧气利用能力增加，这在成人中也有类似的结论。

2.3 乳酸阈值和通气阈值

对青春期前的青少年进行针对性训练可以减少BLA、提高LT和VT，但其深层机制仍有待阐明。现有的解释主要来自成人研究，LT和VT的改善与肌肉乳酸生成率下降有关（Favier et al.，1986）。肌糖原利用率较低或较快的摄氧量动力学（降低了对非氧化糖原利用的依赖）减少了乳酸产生，进而减少了对非氧化糖原利用的初始依赖（肌肉氧化能力增加是BLA减少的主要机制）（Mogensen et al.，2006）。另外，训练增强了肝脏和肌肉中乳酸的吸收和氧化能力，进而提高了机体清除血乳酸的能力（Sumida et al.，1993）。

一项关于11～13岁男孩的相关研究表明，训练后男孩的骨骼肌发生了显著的局部适应，肌糖原、磷酸肌酸（creatine phosphate，CP）、腺嘌呤核苷三磷酸（adenosine triphosphate，ATP）浓度增加，琥珀酸脱氢酶和磷酸果糖激酶活性增加，研究认为，BLA减少可能是由于其他组织对乳酸的利用增多、肌纤维氧化能力增加（Eriksson et al.，1973）。但此研究存在样本量小、缺乏对照组以及未明确受试者的成熟状态等局限，研究结论的信服力令人质疑。目前，关于LT和VT训练适应机制的研究主要来自于对成人的研究，而成人的研究发现能否应用于青春期前青少年仍有待确定。

2.4 跑步经济性

有关成人的研究表明，训练诱导RE改善的相关机制包括肌肉氧化能力增强、运动单位募集、下肢肌力增加以及次最大运动通气量和心率的下降，也可能是良好的肌肉刚度使得在拉长-缩短活动的离心阶段储存了较多的弹性势能，并在向心阶段释放，降低了氧气消耗，从而加快了运动后的恢复（Armstrong，2019a）。然而，目前还没有足够充分的证据去评估训练引起青春期前青少年RE改变的潜在机制。

综上，对于青春期前青少年产生的有氧能力训练适应性主要通过增加SV_{max}，进而增加$\dot{V}O_{2peak}$、加快氧运输和氧利用能力来提高摄氧量动力学。由文献可知，可以从多个方面来评估青少年的有氧能力（如$\dot{V}O_{2peak}$、摄氧量动力学、VT和RE），且各方面的训练适应机制可能有所不同。关于训练对青春期前青少年有氧能力的适应性机制还有许多问题有待解决，如SV的增加归因于心肌形态还是功能适应的改变、LT和VT以及RE的背后机制均有待阐明。

3 影响青少年有氧能力的因素

3.1 年龄

在一定的年龄段，青少年的$\dot{V}O_{2peak}$随年龄增长而增加，摄氧量动力学随年龄增长而变慢，BLA和VT均随年龄增长而下降。横向研究表明，男孩的$\dot{V}O_{2peak}$随年龄增长呈线性增加，一直持续到成年早期；尽管一些研究表明女孩的$\dot{V}O_{2peak}$在13～14岁时趋于平稳，但在相同年龄范围内有着与男孩类似的趋势。（Armstrong，2013；Brodie，1987）。$\dot{V}O_{2peak}$与年龄、性别的关系如图2所示。研究表明，在青春期前和青春期的青少年中，$\dot{V}O_{2peak}$随年龄的增加主要是由于SV增加（Armstrong et al.，2000）。关于年龄、成熟度和性别差异与阶段I的关系目前尚不清楚（Fawkner et al.，2003）。与年龄相关的摄氧量动力学特征（阶段II、III）的纵向研究发现，在青春期前和青春期的青少年中，τ和SC均随年龄的增长而增加（Armstrong et al.，2009；Breese et al.，2010；Fawkner et al.，2004a），且随着年龄的增长，τ和SC的增加是由于I型肌纤维百分比下降（Fawkner et al.，2003）。研究表明，在相同的运动强度下，青少年的血乳酸反应低于成人，LT和VT出现在较高的$\dot{V}O_{2peak}$百分比，且与年龄呈负相关（Armstrong et al.，2008，2011b）。传统的解释是，睾酮、糖酵解酶依赖将脂肪作为燃料以及较高的体力活动水平造成了青少年与成人间的差异，但缺乏确凿的证据（Armstrong et al.，1994）。然而，难以从现有研究得出血乳酸对运动的反应随年龄变化的机制。横向研究数据一致显示，当采用$\dot{V}O_2$与体质量的比值（$mL\cdot kg^{-1}\cdot min^{-1}$）表示RE时，青少年的RE随年龄的增长而改善（Krahenbuhl et al.，1992；Masiszewski et al.，1996）。用体质量表示的RE随年龄发生变化归因于多种机制，包括静息能量消耗、步态模式、步幅和步频、运动单位募集、肌肉的共同收缩、身体成分和质量的分布、运动通气量、灵活性、肌肉氧化能力和底物利用率等（Morgan，2008），但缺乏相关的支持性实验证据。

虽然青少年有氧能力的自然发展受年龄的影响，但其有氧能力的可训练性与年龄无关。Savage等（1986）和Eisenman等（1975）分别对青春期前的青少年与成人、青春期的青少年与成人采用同一训练方案进行对比研究，发现训练后青春前和青春期青少年增加的$\dot{V}O_{2peak}$与成人没有显著差异。Armstrong（2019b）和Mcnarry等（2019）关于青少年摄氧量动力学的综述表明，青少年耐力训练后τ加快和SC减小与年龄、成熟度无关。此外，英国体育与运动科学协会（British Association of Sport and Exercise Sciences，BASE）发布的青少年有氧能力可训练性的专家声明，也明确认为，年龄、性别和成熟度与青少年的有氧能力训练效应不存在相关性（McNarry et al.，2014a）。

3.2 性别

青少年的$\dot{V}O_{2peak}$存在性别差异，在不同运动范围里，摄氧量动力学的性别特征不同。随年龄的增加，$\dot{V}O_{2peak}$的

性别差异逐渐增大，10岁男孩的$\dot{V}O_{2peak}$比同龄女孩高约10%，12岁时性别差异上升至25%左右，14岁时性别差异上升至30%左右，16岁时则达到35%左右（Armstrong，2013）。由于青春期前女孩的最大动静脉氧差较低、肌肉的氧供给与利用不平衡使得青春期前的青少年$\dot{V}O_{2peak}$存在性别差异。而青春期青少年的$\dot{V}O_{2peak}$存在性别差异的原因是青春期男孩有较高的日常体力活动、身体成分（肌肉质量）和血红蛋白浓度（Armstrong et al.，2017）。摄氧量动力学的性别差异源于运动强度的不同，与年龄无关。中强度运动范围内青少年的摄氧量动力学特征无性别差异（Fawkner et al.，2002），而高强度运动时男孩的摄氧量动力学较女孩快，且有显著差异（Fawkner et al.，2004b）。高强度运动时的摄氧量动力学性别差异与男孩的I型肌纤维百分比较高（Armstrong et al.，2015）、每搏输出量较大（Rowland et al.，2000）有关。Armstrong等（1995）研究了青春期前的男孩（n=111）和女孩（n=53）在运动测试中的有氧能力，发现在最大强度运动测试中男孩和女孩的心率、呼吸交换率以及血乳酸浓度无显著差异。由于目前缺乏关于女性青少年运动的血乳酸反应研究，因此缺乏充分的证据表明青少年对运动引起的血乳酸反应存在性别差异（Armstrong，2019b；Armstrong et al.，2017）。虽然男孩的$\dot{V}O_{2peak}$高于女孩，但当使用异速生长控制男孩和女孩的体质量差异后，与男孩相比，女孩通常表现出较好的RE（Krahenbuhl et al.，1992；Welsman et al.，2000）。

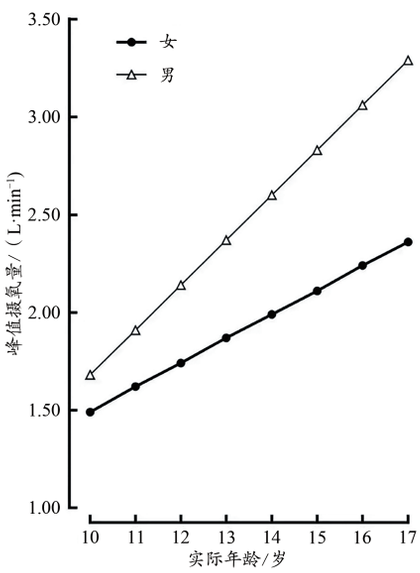

图2　$\dot{V}O_{2peak}$与年龄、性别的关系（Armstrong et al.，1994）

Figure 2.　The Relationship between $\dot{V}O_{2peak}$ and Sex，Age（Armstrong et al.，1994）

尽管男孩的$\dot{V}O_{2peak}$高于女孩，但有研究表明，男孩和女孩的有氧能力训练效应类似（Baquet et al.，2003；Baxter-Jones et al.，1993）。Baquet等（2002）对青春期前的男孩、女孩实施7周有氧训练，发现训练后男孩（＋9.5%）和女孩（＋7.2%）的$\dot{V}O_{2peak}$均显著增加，且性别差异不显著。类似的，Obert等（2003）对青春期前的男孩和女孩进行13周耐力训练，发现$\dot{V}O_{2peak}$均显著增加（男孩＋15%，女孩＋8%），研究发现，训练后$\dot{V}O_{2peak}$显著增加主要是由于SV_{max}的增加，与性别无关。然而，关于青春期前青少年的摄氧量动力学和血乳酸可训练性研究较少，且缺乏性别与训练后的摄氧量动力学、血乳酸和跑步经济性的对比研究。因此尚不能确定青春期前青少年训练后的摄氧量动力学、血乳酸反应与性别的关系。

3.3　成熟度

随着生长和成熟，心输出量随着体型、心脏容积和血容量的增加而增加，使得绝对$\dot{V}O_{2peak}$大幅增加，且男孩较女孩更为明显（Thomas，2004）。摄氧量动力学随成熟度的增加而变慢（Armstrong et al.，2016a）。研究表明，随着青春期前的青少年日渐成熟，肌纤维类型呈现分布不均（I型肌纤维比例减少，II型肌纤维比例增多），同时糖酵解酶活性增强使得乳酸堆积增加，乳酸阈值降低（Ratel et al.，2017）。从代谢角度来说，I型肌纤维比II型肌纤维工作效率更高，而I型肌纤维比例随年龄和成熟度增长而减少。尽管如此，有研究表明，当用$\dot{V}O_2$与体质量的比值（$mL\cdot kg^{-1}\cdot min^{-1}$）表示RE时，青春期前和青春期青少年的RE均低于成人，即RE随成熟度的增加而增加（Armstrong et al.，1996；Krahenbuhl et al.，1992）。成熟度与决定有氧能力生理因素间的关系如图3所示。

虽然青少年有氧能力的自然发展受成熟度的影响，但其有氧能力的可训练性与成熟度无关（Armstrong et al.，2011a，2015，2019；McNarry et al.，2014a）。McNarry等（2012）研究了训练状态和成熟度对青春期前和青春期女孩摄氧量动力学的影响，发现摄氧量动力学对训练状态较为敏感，而训练状态与成熟度没有交互作用。McNarry（2014c）等对10～12岁（青春期前）受过游泳训练和未受过游泳训练男孩和女孩的$\dot{V}O_{2peak}$进行了3年（1年1次）的追踪观察，采用多层模型对数据进行分析后，发现$\dot{V}O_{2peak}$的上升与成熟状态无关。Armstrong（2011a）和McNarry等（2014b）关于训练状态对青少年有氧和无氧运动反应影响的研究综述表明，训练状态对青少年有氧能力的生理变量（$\dot{V}O_{2peak}$、摄氧量动力学、乳酸或通气阈值、运动经济性）具有显著的影响，而训练状态的影响与成熟阶段无关，与训练量的变化、训练测试模式的一致性有关。但反映青少年有氧能力其他指标与成熟度间关系的研究极少。因此，需涵盖青春期前、青春期和青春期后期3个阶段的纵向干预训练研究来探究成熟状态对青少年有氧能力可训练性的影响。

3.4　初始体能水平

青少年的初始体能水平越低，其改善的空间越大，有氧能力基线值与训练后有氧能力提高的幅度呈负相关。

McNarry 等（2015）对肥胖和正常体质量的青春期前青少年实施 6 周 HIIT，发现初始体能基线值低的肥胖青少年其摄氧量动力学显著改善，而初始值较高的正常体质量青少年无显著变化。此外，Armstrong 等（2011a）和 Baquet 等（2003）的综述表明，与初始 $\dot{V}O_{2peak}$ 值高的青少年相比，初始值低的青少年经训练后 $\dot{V}O_{2peak}$ 改善的程度较高。因此，青少年的初始体能水平不仅可以预测其有氧能力提升的空间，还能帮助教练员在青少年中进行有氧能力相关的运动选材。

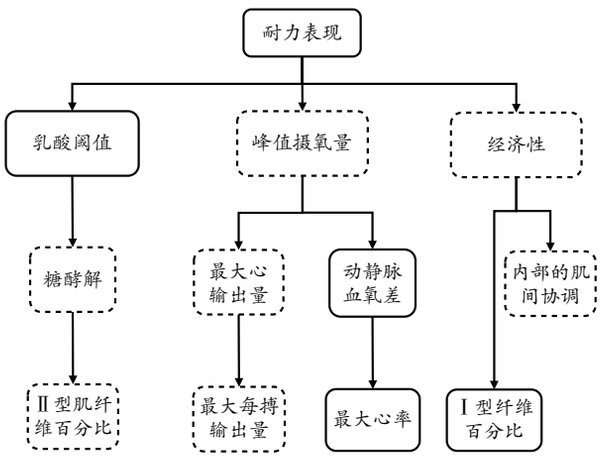

图 3　成熟对耐力表现的主要生理决定因素的影响

（Oliver et al.，2020）

Figure 3.　The Effect of Maturation on the Primary Physiological Determinants of Endurance Performance（Oliver et al.，2020）

注：实线框包含的因素随着成熟度的增加向有利于提高耐力表现的方向变化，虚线框包含的因素随着成熟度的增加而向不利于耐力表现的方向变化变化。

综上，青少年有氧能力的生理指标均随生长和成熟的变化而变化。$\dot{V}O_{2peak}$ 随年龄和成熟度的增长而增加，且性别差异随着年龄的增加而增大；摄氧量动力学、LT 及 VT 均随年龄和成熟度的增长而下降，而 RE 随年龄和成熟度的增加而改善。在性别差异上，高强度运动时男孩摄氧量动力学较女孩快，而女孩的 RE 较男孩好，乳酸没有性别差异。但就目前研究来看，青春期前青少年有氧能力（$\dot{V}O_{2peak}$、摄氧量动力学）的可训练性与年龄、性别及成熟度无关。训练诱发的有氧能力提升幅度与受试者的初始体能水平呈负相关。因此，我们应对青少年早期开始实施科学的训练干预，以提高有氧能力或使其保持在一定的范围。

4　青春期前青少年有氧能力训练计划

青少年有氧能力训练产生的适应性取决于训练计划。国家体育总局发布的《全民健身指南》明确指出，运动锻炼干预应包含运动类型、运动强度和运动时间 3 个基本要素。优化的训练方案还应包括训练频率、持续的时间和恢复等（Baquet et al.，2003）。Armstrong 等（2011a）和 Baquet 等（2003）对多篇青少年耐力训练的实验研究进行了归纳整理发现，两个不同成熟度群体（青春期前和青春期）的训练方案大体一致。且目前关于青春期前青少年有氧能力训练的研究主要是 $\dot{V}O_{2peak}$ 的训练干预研究。本研究梳理了青春期前青少年 $\dot{V}O_{2peak}$ 训练效应显著的相关实验研究（表 1）。

4.1　训练模式

改善青春期前青少年 $\dot{V}O_{2peak}$ 的运动模式主要包括骑行（McManus et al.，2005）、跑步（Gamelin et al.，2009）、游泳（Obert et al.，1996）及抗阻训练（Weltman et al.，1986）等。总结表 1 发现，持续训练（Baquet et al.，2010；Becker et al.，1983；Lussier et al.，1977；Massicote et al.，1974；McManus et al.，1997，2005；Rowland et al.，1995）、间歇训练（Baquet et al.，2002，2010；Gamelin et al.，2009；McManus et al.，1997，2005；Obert et al.，2009；Savage et al.，1986）以及混合（持续、间歇的结合）训练（Danis et al.，2003；Mandigout et al.，2001；Obert et al.，2003）都可以提高青春期前青少年的 $\dot{V}O_{2peak}$。

4.2　训练频率和时间

表 1 中大部分研究的训练频率为 3 次/周，20～60 min/次。Savage 等（1986）的研究训练频率为 5 次/周，Baquet 等（2002）的研究采用了 2 次/周，这两项研究均报道了 $\dot{V}O_{2peak}$ 的显著增加，分别增加了 4.7% 和 8.2%。训练的时间从 12～90 min 不等，大多数研究中训练时间为 20～60 min/次。值得注意的是，采用 12 min/次的研究发现，只有高强度组的 $\dot{V}O_{2peak}$ 呈现显著改善。

4.3　训练强度

运动强度已被证明是训练方案中的决定性因素，普遍采用最大心率作为衡量运动强度的指标。在表 1 所列的 15 项研究中，有 14 项研究采用训练强度≥80%HR_{max}。有两项研究专门针对训练强度进行了研究。Massicote 等（1974）研究了 3 种不同训练强度（66%～72%HR_{max}、75%～80%HR_{max}、88%～93%HR_{max}），但其他要素相同（频率、时间、方案时长）的耐力训练对青春期前男孩有氧能力的影响，发现只有高强度组的 $\dot{V}O_{2peak}$ 显著增加（＋11%）。类似的，Savage 等（1986）比较了 85%HR_{max} 和 68%HR_{max} 对青春期前青少年 $\dot{V}O_{2peak}$ 的影响，发现训练强度为 85%HR_{max} 时 $\dot{V}O_{2peak}$ 显著提高（＋4.7%），当 68%HR_{max} 时 $\dot{V}O_{2peak}$ 则无变化。在这两项研究中所有实验组的训练时间相同，因此，高训练强度组的受试者经历了更多的训练量。

4.4　方案时长

训练方案的时长从 6 周到 24 周不等，表 1 所列的研究中大约 1/3 的研究采用 8 周的训练时长。Danis 等（2003）对青春期前和青春期的男孩实施了 24 周的混合训练，发现 $\dot{V}O_{2peak}$ 显著增加。Massicotte 等（1974）报道了青春期前男孩在 6 周的持续训练后，其 $\dot{V}O_{2peak}$ 也显著增加。

表1　耐力训练对青春期前青少年 $\dot{V}O_{2peak}$ 的影响

Table 1　Effects of Endurance Training on $\dot{V}O_{2peak}$ in Prepubertal Adolescents

文献	研究对象		训练方案					$\dot{V}O_{2peak}$ 改善的幅度/%
	实验组	对照组	频率（次/周）	强度	持续时间/min	方案长度/周	类型	
Massicote et al.，1974	3组，每组 *n*=9（男） 12.5岁	*n*=9（男） 11～13岁	3	E1：88%～93% HR_{max} E2：75%～80% HR_{max} E3：66%～72% HR_{max}	12	6	持续骑行	E1：10.8
Lussier et al.，1977	*n*=15 （10男5女） 10.3岁	*n*=10 （9男1女） 10.5岁	4	92%HR_{max}	45	12	持续跑和游戏	6.8
Becker et al.，1983	*n*=11（男） 9.5岁	*n*=11（男） 9.9岁	3	85%HR_{max}	40	8	持续骑行	20.5
Savage et al.，1986	E1：*n*=8（男） 8.5岁 E2：*n*=12男 8岁	*n*=10（男） 9岁	5	E1：68%HR_{max} E2：85%HR_{max}	2.4～4.8 km	12	间歇跑	E2：4.7
Rowland et al.，1995	*n*=37 （13男24女） 10.9～12.8岁	*n*=37 （13男24女） 10.9～12.8岁	3	80%～85%HR_{max}	20～30	12	有氧周期（训练长跑/走、游戏、篮球）	6.5
McManus et al.，1997	E1：*n*=11（女） 9.8岁 E2：n=12女 9.3岁	*n*=7（女） 9.6岁	3	E1：最大冲刺 E2：80%～85% HR_{max}	E1：8～16 E2：20	8	E1：冲刺跑 E2：持续骑行	E1：4.1 E2：7.3
Mandigout et al.，2001	*n*=35 （18男17女） 10～11岁	*n*=50 （22男28女） 10～11岁	3	80%～90%HR_{max}	60～90	13	持续跑（1次）、间歇跑（1次）、有氧活动（1次）	男：4.2 女：8.5
Baquet et al.，2002	*n*=33 （13男20女） 9.5岁	*n*=20 （10男10女） 9.9岁	2	80%～95%HR_{max}	30	7	间歇跑	8.2
Obert et al.，2003	*n*=19 9男10.5岁 10女10.4岁	*n*=16 （9男7女） 10.7岁	3	持续：80%HR_{max} 间歇：90%HR_{max}	60	13	间歇和持续跑	男：15.4 女：8.1
Danis et al.，2003	*n*=9（男） 11～14岁	*n*=9（男） 11～14岁	3	75%～97%$\dot{V}O_{2peak}$	60	24	间歇和持续跑	10.4
McManus et al.，2005	E1：*n*=10（男） 10.4岁 E2：*n*=10（男） 10.4岁	*n*=15（男） 10.5岁	3	E1：85%HR_{max} E2：最大冲刺	20	8	E1：持续骑行 E2：间歇骑行	E1：7.8 E2：11.0
Gamelin et al.，2009	*n*=22 （12男10女） 9.8岁	*n*=16 （7男9女） 9.3岁	3	80%～90%HR_{max}	30	7	间歇跑	4.8
Obert et al.，2009	*n*=25 （14男11女） 9～11岁	*n*=25 （13男12女） 9～11岁	3	80%～95%HR_{max}	25～30	8	间歇跑	6.6
Baquet et al.，2010	E1：*n*=22 （11男11女） 8～11岁 E2：*n*=22 （12男10女） 8～11岁	*n*=19 （9男10女） 8～11岁	3	E1：80%～90% HR_{max} E2：64%～68% HR_{max}	18～39	7	E1：间歇跑 E2：持续跑	E1：4.98 E2：7.00

综上，$\dot{V}O_{2peak}$的显著改善与训练频率、训练时间和方案时长无关，而训练强度才是诱发$\dot{V}O_{2peak}$发生训练适应的决定因素。研究表明，训练强度需要＞80%HR_{max}才能使得$\dot{V}O_{2peak}$显著增加。

4.5 高强度间歇训练

尽管20多年前就有研究发现，HIIT能够提高青春期前女孩的$\dot{V}O_{2peak}$（Mcmanus et al.，1997），但探索HIIT对青春期前青少年$\dot{V}O_{2peak}$影响的研究仍然较少。符合标准（发表在同行评议的论文中、受试者都是健康的青少年、适量的样本量、包含实验组和对照组、提供了明确的训练处方、用直接测定的$\dot{V}O_{2peak}$作为标准量度）的少数几项关于青春期前青少年的HIIT研究结果表明，经过7～8周的HIIT后，$\dot{V}O_{2peak}$显著增加（Baquet et al.，2004；Mcmanus et al. 2005）。此外，一项meta分析报道，HIIT是提高青春期前青少年$\dot{V}O_{2peak}$的有效手段（Costigan et al.，2015）。与人们习惯采用的恒定强度训练相比，HIIT为缺乏时间的青少年提供了一种替代传统训练且有效的训练方法。但它是否比其他的训练方式更好，尚未得到充分证实（Tolfrey et al.，2017）。

在间歇性训练过程中，有效的恢复是青少年获得有效训练适应的关键。研究发现，两种恢复模式（积极或消极）都能提高青少年的有氧能力，其恢复模式的选择取决于训练计划的总目标（Baquet et al.，2019；Thevenet et al.，2007）。此外，制定HIIT方案时应适当考虑受试者的年龄、成熟状态以及训练经验。

4.6 运动处方

研究认为，运动强度是运动处方的关键因素（Armstrong et al.，2011a；Baquet et al.，2003）。Baquet等（2003）的研究认为，运动强度＞80%HR_{max}是$\dot{V}O_{2peak}$显著改善的必要条件。国际奥委会（IOC）在对优秀青少年运动员训练的共识声明中建议，涉及大肌肉群的持续和间歇训练方案，3～4次/周，40～60 min/次，85%～90%HR_{max}的训练强度是有效改善青少年有氧能力的训练方案（Mountjoy et al.，2008）。Armstrong等（2011a）在国际奥委会建议的基础上提出，提高青少年$\dot{V}O_{2peak}$的适宜训练方案为涉及大肌肉群的持续和间歇运动，3～4次/周，40～60 min/次，最少持续12周，最重要的是，训练强度应该在85%～90%HR_{max}范围内。

虽然研究者们的训练方案各有所不同，但总结上述研究可知，持续的大肌肉群运动，3～4次/周，40～60 min，85%～90%HR_{max}，最低持续12周的有氧能力训练方案能有效改善青少年的有氧能力。由于青少年处于生长发育阶段，以及存在先天遗传、个体差异性等，教练员在设计青少年有氧能力训练方案时要考虑多方面的影响因素，以制定个性化的训练计划。

5 结论

长期以来，受“敏感期”理论的影响，普遍认为青春期前青少年不适宜进行有氧能力训练，这对青少年有氧能力训练科学化产生消极影响。基于国内外权威研究成果，可以形成如下基本共识：虽然青少年的有氧能力受生长和成熟度的影响，但通过训练可以改善不同阶段青少年（青春期前和青春期）的有氧能力。青春期前青少年有氧能力的可训练性与年龄、性别和成熟度无关，训练效益与初始体能、水平呈负相关。青春期前青少年有氧能力的训练适应性机制主要表现为：$\dot{V}O_{2peak}$增加、摄氧量动力学加快、乳酸堆积减少、VT提高。目前，国际较为认同的青少年有氧能力训练的经典模式为：持续和间歇的大肌肉群运动，85%～90% HR_{max}、3～4次/周、40～60 min/次，最少持续12周。

亟待对我国青少年有氧耐力训练进行全面的原创研究，探索青春期前青少年对不同训练模式的适应，探索发育程度、性别、年龄、营养、环境与有氧能力之间的关系，探索有氧能力与其它运动能力的关系，探索有氧能力对运动技能学习的影响，探索青春期前后与成年人对训练的适应差异等，为我国青少年有氧能力科学化训练及青少年体能训练体系建设提供中国鲜活的循证证据支持。

参考文献：

DOTAN R，朱为模，2018. 儿童有氧运动能力可训练性及相关问题［J］. 体育科研，39（2）：18-23，30.

ARMSTRONG N，2013. Aerobic fitness and physical activity in children［J］. Pediatr Exerc Sci，25（4）：548-560.

ARMSTRONG N，2017a. Response to commentary on the special topic：Top 10 research questions related to youth aerobic fitness［J］. Res Q Exerc Sport，88（4）：384-390.

ARMSTRONG N，2017b. Pediatric aerobic fitness and trainability［J］. Pediatr Exerc Sci，29（1）：8-13.

ARMSTRONG N，2019a. Youth aerobic fitness［J］. Pediatr Exerc Sci，31（2）：137-143.

ARMSTRONG N，2019b. Development of Youth Athlete［M］. London：Routledge.

ARMSTRONG N，BARKER A R，2009. Oxygen uptake kinetics in children and adolescents：A review［J］. Pediatr Exerc Sci，21（2）：130-147.

ARMSTRONG N，BARKER A R，2011a. Endurance Training and Elite Young Athletes［M］//ARMSTRONG N，MCMANUS A M，KARGER，et al.. The Elite Young Athlete. Basel，Switzerland：Karger Publishers.

ARMSTRONG N，BARKER A R，MCMANUS A M，2015. Muscle metabolism changes with age and maturation：How do they relate to youth sport performance?［J］. Br J Sports Med，49（13）：860-864.

ARMSTRONG N，KIRBY B J，MCMANUS A M，et al.，1995. Aerobic fitness of prepubescent children［J］. Ann Hum Biol，22（5）：427-441.

ARMSTRONG N，KIRBY B J，WELSMAN J R，et al.，1996. Submaximal Exercise in Pre-pubertal Children［M］//ARMSTRONG N，WELSMAN J R，KIRBY B J. London：Spon：221-227.

ARMSTRONG N，MCNARRY M，2016a. Aerobic fitness and train-

ability in healthy youth：Gaps in our knowledge[J]. Pediatr Exerc Sci，28(2)：171-177.

ARMSTRONG N，MECHELEN W，2017. Oxford textbook of children's sport and exercise medicine[M]. Oxford：Oxford University Press.

ARMSTRONG N，TOMKINSON G，EKELUND U，2011b. Aerobic fitness and its relationship to sport，exercise training and habitual physical activity during youth[J]. Br J Sports Med，45(11)：849-858.

ARMSTRONG N，VAN MECHELEN W，2008. Paediatric Exercise Science and Medicine[M]. Oxford：Oxford University Press：97-108.

ARMSTRONG N，WELSMAN J R，1994. Assessment and interpretation of aerobic fitness in children and adolescents[J]. Exerc Sport Sci Rev，22(1)：435-476.

ARMSTRONG N，WELSMAN J R，2000. Development of aerobic fitness during childhood and adolescence[J]. Pediatr Exerc Sci，12(2)：128-149.

BAQUET G，BERTHOIN S，DUPONT G，et al.，2002. Effects of high intensity intermittent training on peak $\dot{V}O_2$ in prepubertal children[J]. Int J Sports Med，23(6)：439-444.

BAQUET G，DUPONT G，GAMELIN F X，et al.，2019. Active versus passive recovery in high-intensity intermittent exercises in children：An exploratory study[J]. Pediatr Exerc Sci，31(2)：248-253.

BAQUET G，GAMELIN F-X ，MUCCI P，et al.，2010. Continuous vs. interval aerobic training in 8- to 11-year-old children[J]. J Strength Cond Res，24(5)：1381-1388.

BAQUET G，GUINHOUYA C，DUPONT G，et al.，2004. Effects of a short-term interval training program on physical fitness in prepubertal children[J]. J Strength Cond Res，18(4)：708-713.

BAQUET G，VAN PRAAGH E，BERTHOIN S，2003. Endurance training and aerobic fitness in young people[J]. Sports Med，33(15)：1127-1143.

BAXTER-JONES A，GOLDSTEIN H，HELMS P，1993. The development of aerobic power in young athletes[J]. J Appl Physiol，75(3)：1160-1167.

BECKER D M，VACCARO P，1983. Anaerobic threshold alterations caused by endurance training in young children[J]. J Sports Med Phys Fitness，23(4)：445-449.

BREESE B C，WILLIAMS C A，BARKER A R，et al.，2010. Longitudinal changes in the oxygen uptake kinetic response to heavy-intensity exercise in 14- to 16-year-old boys[J]. Pediatr Exerc Sci，22(1)：69-80.

BRODIE A D，1987. Maximal aerobic power：A longitudinal analysis[J]. Br J Sports Med，21(3)：140.

CLEUZIOU C，LECOQ A M，CANDAU R，et al.，2002. Kinetics of oxygen uptake at the onset of moderate and heavy exercise in trained and untrained prepubertal children[J]. Sci Sport，17(6)：291-296.

COSTIGAN S A，EATHER N，PLOTNIKOFF R，et al.，2015. High-intensity interval training for improving health-related fitness in adolescents：A systematic review and meta-analysis[J]. Br J Sports Med，49(19)：1253-1261.

DANIELS J，OLDRIDGE N，1971. Changes in oxygen consumption of young boys during growth and running training[J]. Med Sci Sports，3(4)：161-165.

DANIS A，KYRIAZIS Y，KLISSOURAS V，2003. The effect of training in male prepubertal and pubertal monozygotic twins[J]. Eur J Appl Physiol，89(3-4)：309-318.

EISENMAN P A，GOLDING L A，1975. Comparison of effects of training on $\dot{V}O_{2max}$ in girls and young women[J]. Med Sci Sports，7(2)：136-138.

ERIKSSON B O，GOLLNICK P D，SALTIN B，1973. Muscle metabolism and enzyme activities after training in boys 11-13 years old[J]. Acta Physiol Scand，87(4)：485-497.

FAVIER R J，CONSTABLE SH，CHEN M，et al.，1986. Endurance exercise training reduces lactate production[J]. J Appl Physiol，61(3)：885-889.

FAWKNER D，ARMSTRONG N，2003. Oxygen uptake kinetic response to exercise in children[J]. Sports Med，33(9)：651-669.

FAWKNER S G，ARMSTRONG N，2004a. Longitudinal changes in the kinetic response to heavy-intensity exercise in children[J]. J Appl Physiol，97(2)：460-466.

FAWKNER S G，ARMSTRONG N，2004b. Sex differences in the oxygen uptake kinetic response to heavy-intensity exercise in prepubertal children[J]. Eur J Appl Physiol，93(1-2)：210-216.

FAWKNER S G，ARMSTRONG N，POTTER C R，et al.，2002. Oxygen uptake kinetics in children and adults after the onset of moderate-intensity exercise[J]. J Sports Sci，20(4)：319-326.

GILLIAM T，FREEDSON P，1980. Effects of a 12-week school physical fitness program on peak $\dot{V}O_2$，body composition and blood lipids in 7 to 9-year old children[J]. Int J Sports Med，1(2)：73-78.

GAMELIN F X，BACQUET G，BERTHOIN S，et al.，2009. Effect of high intensity intermittent training on heart rate variability in prepubescent children[J]. Eur J Appl Physiol，105(5)：731-738.

HARRISON C B，GILL N D，KINUGASA T，et al.，2015. Development of aerobic fitness in young team sport athletes[J]. Sports Med，45(7)：969-983.

KATCH V L，1983. Physical conditioning of children[J]. J Adolesc Health Care，3(4)：241-246.

KOBAYASHI K，KITAMURA K，MIURA M，et al.，1978. Aerobic power as related to body growth and training in Japanese boys：A longitudinal study[J]. J Appl Physiol，44(5)：666-672.

KRAHENBUHL G S，WILLIAMS T J，1992. Running economy：Changes with age during childhood and adolescence[J]. Med Sci Sports Exer，24(4)：462-466.

LUSSIER L，BUSKIRK E R，1977. Effects of an endurance training program on assessment of work capacity in prepubertal children[J]. Ann N Y Acad Sci，301：734-741.

MANDIGOUT S，LECOQ A，COURTEIX D，et al.，2001. Effect of gender in response to an aerobic training programme in prepubertal children[J]. Acta Paediatr，90(1)：9-15.

MASSICOTE D，MACNAB R，1974. Cardiorespiratory adaptations to training at specified intensities in children[J]. Med Sci Sports，6(4)：242-246.

MASISZEWSKI A F，FREEDSON P S，1996. Is running economy different between adults and children?[J]. Pediatr Exerc Sci，8(4)：351-360.

MCMANUS A，ARMSTRONG N，WILLIAMS C，1997. Effect of training on the aerobic power and anaerobic performance of prepubertal girls[J]. Acta Paediatr，86(5)：456-459.

MCMANUS A，CHENG C，LEUNG M，et al.，2005. Improving aerobic power in primary school boys：A comparison of continuous

and interval training[J]. Int J Sports Med，26(9)：781-786.

MCNARRY M A，2019. Oxygen uptake kinetics in youth：Characteristics，interpretation，and application[J]. Pediatr Exerc Sci，31(2)：2018-0177.

MCNARRY M，BARKER A，LLOYD R，et al.，2014a. The BASES expert statement on trainability during childhood and adolescence [J]. Sport Exerc Sci，(41)：22-23.

MCNARRY M，JONES A，2014b. The influence of training status on the aerobic and anaerobic responses to exercise in children：A review[J]. Eur J Sport Sci，14(1)：S57-S68.

MCNARRY M A，LAMBRICK D，WESTRUPP N，et al.，2015. The influence of a six-week，high-intensity games intervention on the pulmonary oxygen uptake kinetics in prepubertal obese and normal-weight children[J]. Appl Physiol Nutr Metab，40(10)：1012-1018.

MCNARRY M A，MACKINTOSH K A，STOEDEFALKE K，2014c. Longitudinal investigation of training status and cardiopulmonary responses in pre-and early-pubertal children[J]. Eur J Appli Physiol，114(8)：1573-1580.

MCNARRY M A，WELSMAN J R，JONES A M，2011. Influence of training status and exercise modality on pulmonary O_2 uptake kinetics in pubertal girls[J]. Eur J Appl Physiol，111(4)：621-631.

MCNARRY M A，WELSMAN J R，JONES A M，2012. Influence of training status and maturity on pulmonary O_2 uptake recovery kinetics following cycle and upper body exercise in girls[J]. Pediatr Exerc Sci，24：246-261.

MOGENSEN M，BAGGER M，PEDERSEN P K，et al.，2006. Cycling efficiency in humans is related to low UCP3 content and to type I fibres but not to mitochondrial efficiency[J]. J Physiol，571 (3)：669-681.

MORGAN D W，2008. Locomotor Economy[M]//ARMSTRONG N，VAN MECHELEN W. 2nd edition. Paediatric exercise Science and Medicine. Oxford：Oxford University Press：283-295.

MOUNTJOY M，ARMSTRONG N，BIZZINI L，et al.，2008. IOC consensus statement："Training the elite child athlete"[J]. Br J Sports Med，42(3)：163-164.

MUCCI P，BAQUET G，NOURRY C，et al.，2013. Exercise testing in children：Comparison in ventilatory thresholds changes with interval training[J]. Pediatr Pulmonol，48(8)：809-816.

NOTTIN S，VINET A，STECKEN F，et al.，2002. Central and peripheral cardiovascular adaptations to exercise in endurance-trained children[J]. Acta Physiol Scand，175(2)：85-92.

OBERT P，CLEZIOU C，CANDAU R，et al.，2000. The slow component of O_2 uptake kinetics during high intensity exercise in trained and untrained prepubertal children[J]. Int J Sports Med. 21(1)：31-36.

OBERT P，COURTEIX D，LECOQ A M，et al.，1996. Effect of long-term intense swimming training on the upper body peak oxygen uptake of prepubertal girls[J]. Eur J Appl Physiol Occup Physiol，73 (1-2)：136-143.

OBERT P，MANDIGOUTS S，NOTTIN S，et al.，2003. Cardiovascular responses to endurance training in children：Effect of gender [J]. Eur J Clin Invest，33(3)：199-208.

OBERT P，NOTTIN S，BAQUET G，et al.，2009. Two months of endurance training does not alter diastolic function evaluated by TDI in 9-11-year-old boys and girls[J]. Brit J Sports Med，43(2)：132-135.

OLIVER J L，LLOYD R S，2020. Strength and Conditioning for Young Athletes[M]. London：Routledge.

ORTEGA F B，RUIZ J R，CASTILLO M J，et al.，2008. Physical fitness in childhood and adolescence：A powerful marker of health[J]. Int J Obes，32(1)：1-11.

PETRAY C K，KRAHENBUHL G S，1985. Running training，instruction on running technique，and running economy in 10-year-old males[J]. Res Q Exerc Sport，56(3)：251-255.

POOLE D C，JONES A M，2012. Oxygen uptake kinetics[J]. Compr Physiol，2(2)：933-996.

RATEL S，BLAZEVICH A J，2017. Are prepubertal children metabolically comparable to well-trained adult endurance athletes?[J]. Sports Med，47(8)：1477-1485.

ROWLAND T，GOFF D，MARTEL L，et al.，2000. Influence of cardiac functional capacity on gender differences in maximal oxygen uptake in children[J]. Chest，117(3)：629-635.

ROWLAND T，BOUGAULT V，WALTHER G，et al.，2009. Cardiac responses to swim bench exercise in age-group swimmers and non-athletic children[J]. J Sci Med Sport，12(2)：266-272.

ROWLAND T W，1997. The "trigger hypothesis" for aerobic trainability：A 14-year follow-up[J]. Pediatr Exerc Sci，9(1)：1-9.

ROWLAND T W，BOYAJIAN A，1995. Aerobic response to aerobic exercise training in children[J]. Pediatrics，96(4 Pt 1)：654-658.

RUIZ R，CASTRO-PIÑERO J，ARTERO E G，et al.，2009. Predictive validity of health-related fitness in youth：A systematic review [J]. Brit J Sports Med，43(12)：909-923.

SAVAGE M P，PETRATIS M，THOMSON W H，et al.，1986. Exercise training effects on serum lipids of prepubescent boys and adult men[J]. Med Sci Sports Exer，18(2)：197-204.

SUMIDA K D，URDIALES J H，DONOVAN C M，1993. Enhanced gluconeogenesis from lactate in perfused livers after endurance training[J]. J Appl Physiol. 74(2)：156-160.

THEVENET D，TARDIEU-BERGER M，BERTHOIN S，et al.，2007. Influence of recovery mode（passive vs. active）on time spent at maximal oxygen uptake during an intermittent session in young and endurance-trained athletes[J]. Eur J Appl Physiol，99(2)：133-142.

THOMAS R，2004. Children's Exercise Physiology[M]. Champaign，IL：Human Kinetics.

TOLFREY K，SMALLWOOD J，2017. High-intensity Interval Training[M]//ARMSTRONG N，VAN MECHELEN W. 3rd edition. Oxford：Oxford University Press：477-491.

TOMKINSON G R，LANG J J，TREMBLAY M S，2019. Temporal trends in the cardiorespiratory fitness of children and adolescents representing 19 high-income and upper middle-income countries between 1981 and 2014[J]. Br J Sports Med，53(8)：478-486.

WELSMAN J R，ARMSTRONG N，2000. Longitudinal changes in submaximal oxygen uptake in 11- to 13-year-olds[J]. J Sports Sci，18(3)：183-189.

WELSMAN J R，ARMSTRONG N，WITHERS S，1997. Responses of young girls to two modes of aerobic training[J]. Brit J Sports Med，31(2)：139-142.

WELTMAN A，JANNEY C，RIANS C B，et al.，1986. The effects of hydraulic resistance strength training in pre-pubertal males[J]. Med Sci Sports Exer，18(6)：629-638.

WELTMAN A，WELTMAN J Y，SCHURRER R，et al.，1992. Endurance training amplifies the pulsatile release of growth hormone：Effects of training intensity[J]. J Appl Physiol，72(6)：2188-2196.

WHIPP B J，1980. Dynamics of pulmonary gas exchange during exercise[J]. Pulmonary Gas Exchange，21(2)：33-96.

WHIPP B J，WASSERMAN K，1972. Oxygen uptake kinetics for various intensities of constant-load work[J]. J Appl Physiol，33(3)：351-356.

WILPSBÄUMER D，ROHMANN K，RUPP J，et al.，1998. Effect of long-term intensive endurance training on left ventricular structure and diastolic function in prepubertal children[J]. Int J Sports Medi，19(2)：149-154.

WINLOVE M A，JONES A M，WELSMAN J R，2010. Influence of training status and exercise modality on pulmonary O_2 uptake kinetics in pre-pubertal girls[J]. Eur J Appl Physiol，108(6)：1169-1179.

Aerobic Fitness Training in Prepubertal Adolescents：Trainability，Training Adaption Mechanism and Practical Application

CHEN Yiyi[1, 2]，LI Danyang[2*]，NI Lili[1, 2]

1. Graduate Schools, Wuhan Sports University, Wuhan 430079, China;

2. Fitness Center, Wuhan Sports University, Wuhan 430079, China

Abstract: Aerobic fitness is an important indicator to reflect the physical health level and exercise ability of teenagers. Influenced by the theory of "sensitive period" of youth physical training, the controversies are existed on the issues of trainability, training mechanism, influencing factors and effective training programs, which affects the scientific development of youth aerobic capacity training. Based on existing researches, this study summarized the literatures of aerobic capacity training in prepubertal adolescents. The main conclusions are: 1) The aerobic capacity can be improved through scientific training in prepubertal adolescents; 2) the physiological mechanism of the improvement of aerobic capacity of prepubertal adolescents are as follows: increased stroke output, increased oxygen transport and oxygen utilization capacity, and enhanced muscle metabolism and oxidation capacity; 3) the development of adolescents' aerobic capacity is affected by growth and development, such as chronological age (hereinafter referred to as age) and maturity, the trainability is not related to growth but negatively correlated with the initial physical level; 4) the high-intensity interval training is an economical and effective training method to improve aerobic capacity in prepubertal adolescents; 5) the common pattern of aerobic capacity training for adolescents is: incorporates continuous and interval exercises involving large muscle groups, the training program duration lasts 12 weeks, the training is conducted 3 to 4 sessions per week, 40 to 60 minutes per session, and the intensity is 85% to 90% of maximum heart rate. Among them, the training intensity is the decisive factor affecting training effect.

Keywords: *prepubertal; adolescent; aerobic fitness; oxygen uptake dynamics; trainability*