

呼吸肌训练对运动表现的影响及其生理机制：研究进展与展望

何 龙¹, 张博华¹

(1. 贵州医科大学 运动与健康学院, 贵州 贵阳 550000)

摘要:呼吸肌训练(respiratory muscle training, RMT)作为提升运动表现的新型训练手段,近年来在体育科学领域受到广泛关注。本文系统综述了呼吸肌的结构与功能特征、运动中呼吸肌疲劳的发生机制及其对运动表现的制约作用,梳理了RMT的主要训练类型与参数优化方案,归纳了RMT在耐力性项目、技巧性与平衡性项目、球类与对抗性项目中的应用现状,并从肌纤维结构适应、肺通气功能增强、呼吸代谢反射减弱、核心稳定性与动力链优化四个方面阐述了RMT改善运动表现的生理机制。现有Meta分析证据表明,RMT可显著提高运动员最大吸气压(大效应量)、肺活量、每分最大通气量及计时测试成绩,其中吸气压力阈值负荷训练、持续8-12周、每周5-7天的方案效果最优。最后指出当前研究在样本代表性、机制研究深度、长期效果追踪等方面的不足,并对未来研究方向进行展望。

关键词:呼吸肌训练; 运动表现; 呼吸肌疲劳; 呼吸代谢反射; 核心稳定性; Meta分析

DOI: doi.org/10.70693/202609089025

一、引言

在竞技体育运动中,呼吸系统承担着为机体摄取氧气、排出二氧化碳的关键功能。传统运动训练理论曾认为健康人的呼吸系统在运动中不会构成功能限制,但近三十年来的大量研究表明,即使是健康运动员,在高强度运动中呼吸肌也会出现疲劳,进而影响运动表现^[1-2]。呼吸肌疲劳不仅导致通气效率下降,还通过"呼吸代谢反射"引发交感神经介导的血流重分配,使肢体运动肌血流被"抢占",加速外周疲劳^[3]。

呼吸肌训练(respiratory muscle training, RMT)是指通过施加外部负荷或控制通气模式,对呼吸肌进行专门的抗阻或耐力训练,以提高呼吸肌力量和耐力、延缓呼吸肌疲劳发生的训练方法^[4]。RMT最初应用于慢性阻塞性肺疾病(COPD)等临床康复领域,自20世纪90年代起逐渐延伸至竞技体育训练中,目前已被应用于跑步、自行车、划船、游泳、足球、短道速滑、攀岩等众多项目^[5-6]。

近年来,多项系统综述和Meta分析为RMT的运动表现提升效应提供了量化证据。Illi等^[5]纳入46项研究的Meta分析表明,RMT对健康人群的运动耐力表现具有显著改善作用,且运动持续时间越长效果越显著。谢福志等^[6]筛选21篇文献的Meta分析显示,RMT对运动员吸气肌力量(大效应量)和有氧耐力指标均有显著提升。徐振等^[7]纳入31项随机对照试验的Meta分析进一步证实,RMT可显著提高运动员最大吸气压、肺活量、每分最大通气量及计时测试成绩。尽管如此,RMT在不同项目中的适用性差异、最优训练方案的确定以及深层生理机制的阐明仍存在争议。基于此,本文系统梳理RMT的研究进展,旨在为其在运动训练实践中的科学化应用提供理论参考。

二、呼吸肌的结构与功能特征

呼吸肌群是呼吸运动的动力来源,依据功能可分为吸气肌(膈肌、肋间外肌等)和呼气肌(肋间内肌、腹肌等)两大类^[8]。正常呼吸中吸气为主动过程,呼气多为被动完成,膈肌承担约60%~80%的吸气工作量,是最主要的吸气肌和训练靶肌^[9]。膈肌含有丰富的I型(慢缩氧化型)肌纤维(约56%),与其持续节律性收缩、抗疲劳的功能特征相适应^[10]。Sauleda等^[10]发现膈肌纤维大小与最大吸气压(MIP)呈显著正相关($r=0.67$),表明结构特征直接决定功能输出。此外,膈肌同时参与维持腹内压和躯干稳定^[11],用力吸气时膈肌收缩下降使腹内压升高,为躯干提供"刚性支撑",是核心稳定性的重要生理基础。呼吸肌的通气与躯干稳定双重功能,为RMT改善核心稳定性和运动表现提供了解剖学依据。

作者简介:何 龙(2003—),男,硕士,研究方向为体育教学;

通讯作者:张博华(1991—),男,副教授,研究方向为体育教学与户外运动。

三、运动中呼吸肌疲劳及其对运动表现的制约

(一) 呼吸肌疲劳的发生机制

呼吸肌疲劳是指呼吸肌在反复舒缩过程中无法产生维持正常肺泡通气所必需的胸腔压力,主要表现为收缩力量与速度的减弱,可通过充分休息恢复^[9]。运动诱发的呼吸肌疲劳主要发生在高强度运动中,当运动强度超过 85%最大摄氧量或 80%最大做功时,呼吸肌的通气需求急剧增加,持续高强度活动导致局部代谢产物(乳酸、氢离子)堆积,能量代谢效率下降,从而引发收缩力减弱^[2]。Romer 和 Polkey^[2]指出,高强度耐力运动中呼吸肌的代谢需求可占据心输出量的 14%~16%,如此高的能量消耗使呼吸肌极易发生疲劳。呼吸肌疲劳的测评方法主要包括最大跨膈压(P_{di,max})、MIP、最大呼气压(MEP)、膈肌张力时间指数(TT_{di})等,其中 MIP 因其无创性和操作简便而应用最为广泛^[12]。

(三) 呼吸代谢反射及其对运动表现的制约

呼吸肌疲劳对运动表现的制约不仅在于通气效率下降,更重要的是通过"呼吸代谢反射"引发血流重分配,限制肢体运动肌灌注。Harms 等^[13]的经典研究发现,高强度运动中呼吸肌疲劳时,III类和IV类肌肉传入纤维被代谢产物激活,通过脊髓反射引起交感神经活动增强,导致外周血管收缩,优先保障呼吸肌供血,却使肢体运动肌血流量减少。Rodman 等^[14]在动物实验中证实,激活呼吸代谢反射后平均动脉压升高 21%±7%,后肢血流量减少 20%±9%,且该效应可被肾上腺素能受体阻滞剂完全消除。这一"优先保障呼吸肌供血而限制运动肌血流"的反射对运动表现具有双重效应:保障通气的同时因运动肌血流不足而加速外周疲劳^[3]。Witt 等^[15]的研究进一步发现,吸气肌训练可通过降低呼吸肌化学敏感性传入神经活动,减弱呼吸代谢反射的心血管效应;Chan 等^[16]还发现该反射抑制效应在停训 5 周后仍维持 80%以上,证实了 RMT 影响的长效性。

四、呼吸肌训练的方法学进展

(一) 训练类型

依据训练特征,RMT 可分为阻力训练(RT)和耐力训练(ET)两大类^[4]。阻力训练通过呼吸阻力设备(如阈值压力负荷训练器 IPTL、吸气气流阻力训练器 IFRL)施加可控的吸气阻力,以提高呼吸肌力量为主;耐力训练则通过自主过度通气(VIH)等方式,在较低阻力下维持较长时间的高通气,以提高呼吸肌耐力为主。徐振等^[7]的 Meta 分析亚组结果显示,IPTL 训练对 MIP 的提升效果(MD=27.10)显著优于 IFRL 和 VIH 训练,表明压力阈值负荷训练是提高呼吸肌力量的最优方式。依据靶肌群不同,RMT 又可分为吸气肌训练(IMT)和呼气肌训练(EMT)。目前绝大多数研究以 IMT 为主,谢福志等^[6]的 Meta 分析显示 RMT 对 MIP 的效应量(SMD=-0.83,大效应量)显著大于对 MEP 的效应量(SMD=-0.43,小效应量),这与现有训练方案多针对吸气肌有关。

(二) 训练参数的优化:基于 Meta 分析的证据

训练参数(强度、频率、周期)的合理设定是决定 RMT 效果的关键。在训练周期方面,徐振等^[7]的 Meta 回归分析显示,训练时间是引起 MIP 研究间异质性的主要因素($P<0.05$),亚组分析表明 8~12 周的训练效果(MD=39.65)显著优于 4~6 周(MD=23.05)。在训练频率方面,5~7 天/周的训练频率(MD=33.01)优于 2~4 天/周(MD=24.26);谢福志等^[6]也发现 6~10 次/周和 11~14 次/周的效果优于 2~5 次/周。在训练强度方面,现有研究多采用 50%~80%MIP 作为初始负荷,并采用渐进超负荷原则每 2~4 周递增 5%~10%^[17]。综合现有 Meta 分析证据,目前较为推荐的 RMT 方案为:采用吸气压力阈值负荷训练器,初始强度 50%~60%MIP,每周训练 5~7 天(或每天 1~2 次),每次 30 次吸气×4~6 组,组间休息 60~90 秒,持续 8~12 周,并每 2~4 周递增负荷 5%~10%。

五、呼吸肌训练在不同运动项目中的应用

(一) 耐力性项目

耐力性项目(中长跑、自行车、划船、游泳等)是 RMT 应用最早、研究最多的项目,这与耐力运动中通气需求高、呼吸肌疲劳发生早密切相关。Volianitis 等^[18]针对优秀划船运动员的研究显示,11 周 IMT 后 5000m 划船测功仪成绩显著提高,且核心肌群激活延迟时间缩短。Johnson 等^[19]对自行车运动员的研究发现,4 周 IMT 后 40km 计时赛成绩和无氧功能能力显著提高。在游泳项目中,马若君^[20]对游泳儿童的研究显示 8 周 RMT 可显著改善呼吸机能和有氧耐力。然而,谢福志等^[6]的 Meta 亚组分析发现,游泳运动员 RMT 后计时测试成绩的提

升幅度仅为小效应量 ($d=0.2$)，显著低于其他项目 (中等效应量)，这可能与游泳项目中呼吸节奏受动作周期限制、RMT 的迁移效应较弱有关，提示 RMT 在不同项目中的适用性存在差异。

(二) 技巧性与平衡性项目

近年来，RMT 在技巧性与平衡性项目 (短道速滑、攀岩、滑雪、击剑等) 中的应用逐渐受到关注。这类项目对核心稳定性和动态平衡能力要求极高，而 RMT 通过增强膈肌功能、改善腹内压调节来提升核心稳定性的机制，使其在这类项目中具有独特价值。Kowalski 等^[21]对精英短道速滑运动员进行 6 周 RMT，结果显示运动员膈肌与腰腹部核心肌群的同步激活延迟时间缩短 28%，动态平衡误差率降低。Helfer 等^[22]针对高海拔攀登者的研究发现，12 周 RMT 可使模拟 3600m 海拔环境下的运动耐力时间延长 44%。Klusiewicz 等^[23]对越野滑雪运动员的研究显示 7 周 RMT 可改善运动和肺活量参数。李超凡^[24]的研究发现呼吸训练可显著提高击剑运动员的核心稳定性和平衡能力。这些研究表明 RMT 在技巧性与平衡性项目中具有广阔应用前景。

(三) 球类与对抗性项目

球类与对抗性项目 (足球、手球、橄榄球等) 具有间歇性高强度运动的特征。谢福志等^[6]的 Meta 亚组分析显示，足球运动员 RMT 后计时测试成绩的提升幅度 (中等效应量) 显著优于游泳运动员 (小效应量)，提示 RMT 在间歇性高强度项目中可能具有更好的应用效果。Wylie 等^[25]对优秀足球运动员的研究发现，6 周 IMT 后反复冲刺能力和 YO-YO 间歇恢复测试成绩显著提高，比赛中高强度跑动距离增加。Hartz 等^[26]对优秀手球运动员的研究显示 12 周 RMT 可显著提高 MIP 和 12min 跑成绩。总体而言，RMT 在球类与对抗性项目中的应用研究相对较少，但现有证据表明其对间歇性高强度运动能力具有积极影响，未来应加强在篮球、排球、羽毛球等更多项目中的应用研究。

六、呼吸肌训练改善运动表现的生理机制

(一) 肌纤维结构与功能适应

RMT 改善运动表现的最直接机制是呼吸肌本身的结构与功能适应。与骨骼肌训练类似，长期 RMT 可诱导呼吸肌产生肌纤维肥大、肌纤维类型转变和代谢功能增强等适应性变化。研究表明，IMT 可使膈肌 I 型纤维增加 38%、II 型纤维增加 21%^[27]。肌纤维结构的改变直接表现为 MIP 和 MEP 的显著提高，这在多项 Meta 分析中得到了一致证实^[6-7]。呼吸肌力量和耐力的增强使运动中呼吸肌能够以更少的肌纤维募集完成相同的通气任务，从而延缓疲劳发生。此外，RMT 还可改善呼吸肌的收缩效率，增加吸气肌缩短速度，使呼吸肌在相同通气量下的耗氧量减少^[28]。

(二) 肺通气功能增强

RMT 可提高运动员的肺通气功能，如肺活量 (FVC)、每分最大通气量 (MVV) 等^[29]。徐振等^[7]的 Meta 分析显示，RMT 后运动员 FVC (MD=0.13) 和 MVV (MD=7.65) 均显著提高。在同等强度下，RMT 后每分通气量和呼吸频率下降，减少无效腔耗氧量；在相同每分通气量时肺泡通气量上升，呼吸效率提高，氧气摄取量增加，达到工作肌的氧量增多^[6]。

(三) 呼吸代谢反射减弱与血流重分配优化

RMT 改善运动表现的核心机制之一是减弱呼吸代谢反射，优化运动中血流分配。如前所述，高强度运动中呼吸肌疲劳通过 III 类和 IV 类传入纤维激活交感神经，引起外周血管收缩，限制肢体运动肌血流。Witt 等^[15]的研究证实，5 周 IMT 后受试者在阻力呼吸任务中心率和平均动脉压的交感兴奋反应明显减弱，提示 IMT 可通过降低呼吸肌化学敏感性传入神经活动，减弱呼吸代谢反射的心血管效应。Romer^[2]进一步指出，IMT 通过缓解血流竞争、降低呼吸肌耗氧，让更多血液流向工作肌群，间接为耐力运动后期“氧供不足”提供了解决方案。这种血流重分配的优化使运动肌在高强度运动后期仍能获得充足氧供，从而延缓外周疲劳、维持运动输出。

(四) 核心稳定性与动力链传递优化

近年来，RMT 通过增强核心稳定性来改善运动表现的机制逐渐受到重视。膈肌作为主要的呼吸肌，同时参与维持腹内压和躯干稳定^[11]。RMT 通过增强膈肌力量和耐力，提高了膈肌在维持腹内压中的贡献，使躯干在运动中获得更稳定的“刚性支撑”。Volianitis 等^[18]对划船运动员的研究显示，11 周 RMT 后核心肌群激活延迟时间缩短，动力链传递效率显著提升。Kowalski 等^[21]对短道速滑运动员的研究也发现 RMT 后膈肌与核心肌群的同步激活延迟时间缩短 28%。核心稳定性的增强不仅有利于维持运动中的身体姿态、减少能量浪费，还能优化上

下肢之间的力量传递,提高动作效率。这一机制解释了为何 RMT 在对核心稳定性要求较高的技巧性与平衡性项目中也能产生积极效果,拓展了 RMT 的应用理论边界。

七、研究局限与展望

当前研究仍存在以下局限:第一,样本代表性不足,现有研究多以男性运动员或特定项目为对象,女性、青少年和大众人群的研究较少,而 O'Halloran 等^[30]表明性别和年龄可能影响呼吸代谢反射强度。第二,机制研究深度不够,对肌纤维类型转变、膈肌厚度变化、神经肌肉控制适应等深层机制研究较少。第三,训练方案标准化程度不高,各研究在类型、强度、频率、周期上差异较大。第四,长期效果和停训效应研究不足,干预期多为 4-12 周。第五,RMT 与其他训练方法的联合应用研究不足。

未来研究方向:(1)扩大样本范围,加强对女性、青少年、不同水平和项目人群的研究;(2)结合膈肌超声、肌电、分子生物学等技术深化机制研究;(3)开展剂量-效应研究,建立标准化方案;(4)加强长期追踪,明确效果维持时间和最优维持方案;(5)探索 RMT 与核心训练、耐力训练的联合应用;(6)拓展 RMT 在运动损伤预防和康复领域的应用。

八、结论

(1)呼吸肌(尤其是膈肌)具有通气与维持躯干稳定的双重功能,高强度运动中呼吸肌疲劳通过呼吸代谢反射引发血流重分配,制约肢体运动肌灌注和整体运动表现。

(2)RMT 主要包括阻力训练和耐力训练两种类型,其中吸气压力阈值负荷训练效果最优。Meta 分析证据表明,持续 8~12 周、每周 5~7 天、初始强度 50%~60%MIP 并渐进递增的方案可显著提高运动员 MIP (大效应量)、FVC、MVV 及计时测试成绩(中等效应量)。

(3)RMT 在耐力性项目中应用最为广泛,在技巧性与平衡性项目和球类与对抗性项目中也显示出积极效果,但不同项目间的迁移效应存在差异,游泳项目的效果相对较弱。

(4)RMT 改善运动表现的生理机制包括呼吸肌肌纤维结构与功能适应、肺通气功能增强、呼吸代谢反射减弱与血流重分配优化、核心稳定性与动力链传递优化四个方面,各机制相互协同、共同作用。

(5)当前研究在样本代表性、机制研究深度、方案标准化、长期效果追踪等方面仍存在不足,未来应从多人群、多层面、多方法联合等方向深入研究,推动 RMT 在运动训练实践中的科学化应用。

参考文献:

- [1] 邓树勋,王健,乔德才,等.运动生理学(第三版)[M].北京:高等教育出版社,2015.
- [2] Romer L M, Polkey D A. Exercise-induced respiratory muscle fatigue: implications for performance[J]. Journal of Applied Physiology, 2008, 104(3): 879-896.
- [3] Seals D R. Robin Hood for the lungs? A respiratory metaboreflex that "steals" blood flow from locomotor muscles[J]. The Journal of Physiology, 2001, 537(Pt 1): 2.
- [4] 卢宁艳,王健.呼吸肌耐力训练研究进展[J].中国运动医学杂志,2004,(06): 660-662+700.
- [5] Illi S K, Held U, Frank I, et al. Effect of respiratory muscle training on exercise performance in healthy individuals: a systematic review and meta-analysis[J]. Sports Medicine, 2012, 42(8): 707-724.
- [6] 谢福志,刘艳明,黄莹.呼吸肌训练对运动员有氧耐力影响的 Meta 分析[J].吉林体育学院学报,2020,36(04): 55-64.
- [7] 徐振,王一迪,温宇红.呼吸肌训练对运动员呼吸肌功能及运动表现影响的 Meta 分析[J].湖北体育科技,2022,41(04): 337-345.
- [8] Aliverti A. The respiratory muscles during exercise[J]. Breathe, 2016, 12(2): 165.
- [9] 黄克武,王辰.呼吸肌疲劳与撤机[J].中华内科杂志,2002,(02): 68-70.
- [10] Saucedo J, Gea J, Orozco-Levi M, et al. Structure and function relationships of the respiratory muscles[J]. European Respiratory Journal, 1998, 11(5): 906-911.
- [11] 王佳媛.核心肌肉与呼吸肌肉性能表现之间的关系研究[D].辽宁师范大学,2012.
- [12] 朱同乐.呼吸肌训练对健康大学生心肺功能及耐力运动能力影响的实验研究[D].山东师范大学,2010.
- [13] Harms C A, Babcock M A, McClaran S R, et al. Respiratory muscle work compromises leg blood flow during maximal exercise[J]. Journal of Applied Physiology, 1997, 82(5): 1573-1583.
- [14] Rodman J R, Henderson K S, Smith C A, et al. Cardiovascular effects of the respiratory muscle metaboreflexes in dogs: rest and exercise[J]. Journal of Applied Physiology, 2003, 95(3): 1159-1169.

- [15] Witt J D, Guenette J A, Rupert J L, et al. Inspiratory muscle training attenuates the human respiratory muscle metaboreflex[J]. *The Journal of Physiology*, 2007, 584(3): 1019-1028.
- [16] Chan J S, Mann L M, Doherty C J, et al. The effect of inspiratory muscle training and detraining on the respiratory metaboreflex[J]. *Experimental Physiology*, 2023, 108(4): 636-649.
- [17] Qin L, Liu S, Hu S, et al. The Effect of Inspiratory Muscle Training on Health-Related Fitness in College Students[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2024, 21(8): 1088.
- [18] Volianitis S, McConnell A K, Koutedakis Y, et al. Inspiratory muscle training improves rowing performance[J]. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 2001, 33(5): 803-809.
- [19] Johnson M A, Sharpe G R, Brown P I. Inspiratory muscle training improves cycling time-trial performance and anaerobic work capacity but not critical power[J]. *European Journal of Applied Physiology*, 2007, 101(6): 761-770.
- [20] 马若君. 呼吸肌训练对游泳儿童呼吸机能及有氧耐力影响实验研究[D]. 宁夏大学, 2022.
- [21] Kowalski T, Klusiewicz A, Rębiś K, et al. Comparative study of different respiratory muscle training methods: effects on cardiopulmonary indices and athletic performance in elite short-track speedskaters[J]. *Life*, 2024, 14(9): 1159.
- [22] Helfer S, Quackenbush J, Fletcher M, et al. Respiratory muscle training and exercise endurance at altitude[J]. *Aerospace Medicine and Human Performance*, 2016, 87(8): 704-711.
- [23] Klusiewicz A, Starczewski M, Sadowska D, et al. Effect of high- and low-resistance inspiratory muscle training on physiological response to exercise in cross-country skiers[J]. *The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 2018, 59(7): 1156-1161.
- [24] 李超凡. 呼吸训练对击剑运动员核心稳定性及平衡能力的影响研究[D]. 首都体育学院, 2023.
- [25] Wylie L J, McEmery I, Williams E L, et al. Inspiratory muscle training improves repeated-sprint ability in team-sport athletes[J]. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 2018, 13(1): 12-19.
- [26] Hartz D, Gloeckl R, Mrosek M, et al. Effects of inspiratory muscle training in elite handball players[J]. *Respiration*, 2018, 96(1): 37-45.
- [27] 马红梅. 大学生呼吸肌耐力与肺活量、最大摄氧量的相关研究[D]. 杭州师范大学, 2016.
- [28] Spengler C M, Knöpfli-Lenzin C. Does inspiratory muscle training improve exercise performance?[J]. *Breathe*, 2008, 4(4): 312-320.
- [29] 梁辰, 马云, 桑立红, 等. 中国优秀运动员肺功能及相关因素分析[J]. *中国运动医学杂志*, 2008, (03): 312-315.
- [30] O'Halloran K D. Potentiated respiratory metaboreflex in older males and females: afferent or efferent mechanisms?[J]. *Journal of Physiology*, 2023, 601(3).

Effects of Respiratory Muscle Training on Athletic Performance and Its Physiological Mechanisms: Research Progress and Prospects

He Long¹, Zhang Bohua¹

1.School of Sports and Health, Guizhou Medical University, Guiyang, China

Abstract: Respiratory muscle training (RMT), as a novel training method for improving athletic performance, has received extensive attention in sports science. This paper systematically reviews the structural and functional characteristics of respiratory muscles, the mechanisms of exercise-induced respiratory muscle fatigue and its restrictive effects on athletic performance, summarizes the main training types and parameter optimization schemes of RMT, and reviews its application status in endurance events, skill and balance events, as well as ball and combat sports. The physiological mechanisms by which RMT improves athletic performance are elaborated from four aspects: muscle fiber structural adaptation, enhanced pulmonary ventilation, attenuated respiratory metaboreflex, and optimized core stability and kinetic chain transmission. Existing meta-analysis evidence indicates that RMT can significantly improve athletes' maximal inspiratory pressure (large effect size), forced vital capacity, maximal voluntary ventilation, and time-trial performance, with inspiratory pressure threshold loading training lasting 8-12 weeks at a frequency of 5-7 days per week yielding the optimal effects. Finally, this paper points out the limitations of current research and prospects future research directions, aiming to provide theoretical references for the scientific application of RMT in sports training practice.

Keywords: respiratory muscle training; athletic performance; respiratory muscle fatigue; respiratory metaboreflex; core stability; meta-analysis