

·循证医学·

不同运动方式对儿童青少年心肺适能干预效果的剂量反应网状meta分析*

卢冬磊^{1,2,3} 柳鸣毅^{1,2,3,4} 孔年欣^{1,2,3}

最大摄氧量(maximum oxygen uptake, VO_{2max})是评估心肺适能的金标准,直接反映机体的氧输送与利用能力,并与心血管健康、代谢功能及全因死亡率密切相关^[1]。 VO_{2max} 水平较低不仅影响个体的运动能力和日常生活质量,还与成年后心血管疾病、代谢综合征及早发性高血压的发生风险增加密切相关^[2]。在生命早期建立良好的心肺耐力基础,对于降低成年期慢病风险、提高生活质量至关重要^[3]。因此,寻找有效的干预策略以提升 VO_{2max} 具有重要的公共健康价值。运动干预是改善儿童青少年心肺适能的有效方式^[4-6],目前临床上有关运动干预儿童青少年心肺适能的研究大多局限于单一干预方式的临床随机对照试验,且结果具有一定的争议。既往meta分析大多基于运动模式对 VO_{2max} 影响的二元比较,但未能系统化运动剂量与 VO_{2max} 改善效应的具体关系^[1,7]。此外,传统meta分析方法通常将不同运动剂量的干预结果视为同质化数据,难以识别最低有效剂量及剂量反应阈值^[8]。基于此,本研究采用代谢当量(metabolic equivalent of task, METs)量化运动剂量^[9-10],引入剂量反应网状meta分析^[11],在整合随机对照试验数据的基础上,构建运动剂量 VO_{2max} 效应模型,以明确不同运动包括有氧训练(aerobic training, AT)、抗阻训练(resistance training, RT)、组合训练(combined training, CT)、高强度间歇训练(high-intensity interval training, HIIT)、身心运动训练(mind body training, MBT)、小场地运动训练(small sided training, SSG)与剂量对 VO_{2max} 提升的非线性剂量-效应关系,为儿童青少年心肺适能的精准运动处方的制定提供更科学、有效的循证证据。

1 资料与方法

本研究严格遵循系统评价和荟萃分析的首选报告项PRISMA指南进行,PROSPERO注册号:CRD42025645668。

1.1 纳入与排除标准

纳入标准:根据PICOS原则确定纳入标准:①研究类型:

随机对照试验;②研究对象:平均年龄 ≤ 19 岁的儿童和青少年;③干预措施:实验组接受AT、RT、CT、HIIT、MBT、SSG干预,对照组无干预仅维持日常活动;④结局指标: VO_{2max} ;⑤发表年份:2000年1月—2025年2月;⑥语言:中英文。

排除标准:①无法获取全文、提取有效数据的文献;②重复报告的文献;③无基线结果的文献;④质量较低的文献。

1.2 检索方法

选用数据库包括:中国知网、万方、维普、Web of Science、PubMed、Embase、Scopus 和 science direct, cochrane library 中英文数据库。中文检索词包括“儿童/青少年”“锻炼/身体活动/体育锻炼”“最大摄氧量/心肺适能”“随机对照试验”等;英文检索词包括“children/adolescents”“exercise/physical activity/physical exercise”“ VO_{2max} /cardiorespiratory fitness”“randomized controlled trial”。以中国知网数据为例,检索策略:主题=(“最大摄氧量”OR“心肺适能”)AND主题(“身体活动”OR“体育锻炼”)AND主题=(“随机对照实验”)。检索时间:2025年1月。

1.3 文献筛选与数据提取

根据纳入与排除标准,由两名研究人员独立对文献进行筛选与信息的提取,提取文献内容包括:①基本信息;②样本量;③研究对象的基本情况;④干预方案;⑤结局指标。

1.4 文献质量评价

本研究利用Revman 5.4 偏倚风险评估工具软件进行文献质量评价,包括随机序列生成、分配隐藏、受试者及研究人员的盲法、结果的盲法、结局不完整、选择性报告及其他偏倚。由于本研究为干预类文献,针对受试者无法做到双盲,因此会影响最终文献质量评估结果。

1.5 统计学分析

配对meta分析:使用R软件的随机效应模型计算均值差(mean difference, MD)及95%置信区间(confidence interval, CI),并采用BUGSnet包进行双变量meta分析。异质性检验采用Q检验及 I^2 统计量,若 $I^2 > 50\%$,则认为异质性较高,

DOI:10.3969/j.issn.1001-1242.2026.07.016

*基金项目:国家社会科学基金重点项目(24ATY010)

1 武汉体育学院中国青少年体育与体教融合公共政策研究中心,湖北省武汉市,430079; 2 武汉体育学院运动训练学院; 3 武汉体育学院特色竞技体育高质量发展研究中心; 4 通讯作者

第一作者简介:卢冬磊,男,博士研究生; 收稿日期:2025-03-28

进行亚组分析与敏感性分析,判断结果的稳健性。

网状 meta 分析:使用 R 软件 gemtc 包,采用贝叶斯网络 meta 分析模型评估不同运动干预方式相较对照组对 $VO_2\max$ 的改善效应,网络证据图中线条中数据表示两个干预措施之间的研究数量,圆点大小表示样本量的大小。评价指标统一采用 MD 及其 95%CI,反映不同运动干预对 $VO_2\max$ 的改善效应。通过计算累积排序曲线下面积(surface under the cumulative ranking curve, SUCRA)评估各干预在网络分析中的相对排序概率(数值越高表示改善效果越优)。模型收敛性通过 Brooks-Gelman-Rubin 诊断统计量评估。

剂量-效应网状 meta 分析:采用 MBNMAdose 包进行剂量-效应建模^[11],根据不同函数拟合度效果选定 Emax 函数模型进行分析。

最低临床显著变化值(minimal clinically important difference, MCID):通过分布法计算 MCID^[12],即:

$$SD_{pooled} = \sqrt{\frac{\sum (n_i - 1)SD_i^2}{\sum (n_i - 1)}}$$

合并标准差(SD_{pooled})来源于平行随机对照试验,其中, n_i 为每个研究组的受试者人数, SD_i 为该研究组均值变化的标准差。当 SD_{pooled} 为0.5时,相应的合并效应量表明达到 MCID^[13]:

$$MCID = 0.5 \times SD_{pooled}$$

2 结果

2.1 文献检索结果

初步检索共获得 812 篇文献,剔除重复文献后剩余 349 篇。筛选题目与摘要,经全面审阅后,最终纳入 47 篇文献。文献筛选流程见图 1。

2.2 文献偏倚风险评估

所纳入的 47 篇文献均采用随机对照或半随机对照试验研究,其中 40 篇文献采用单盲,1 篇文献数据报告不完整,由图 2 可知,所纳入文献存在一定的偏倚风险。

2.3 纳入文献基本特征

本研究共纳入 2000 年至 2025 年发表的 47 项研究^[5-6,14-58],涉及 3261 名年龄 6 至 19 岁的儿童和青少年,年龄中位数为 12.8 岁,涉及 6 种不同的运动方式(表 1)。

2.4 传统配对 meta 分析

本部分共纳入 10 项随机对照试验研究^[6,16,20,23,29,33,35-36,44,52,57]

图 1 文献筛选流程图

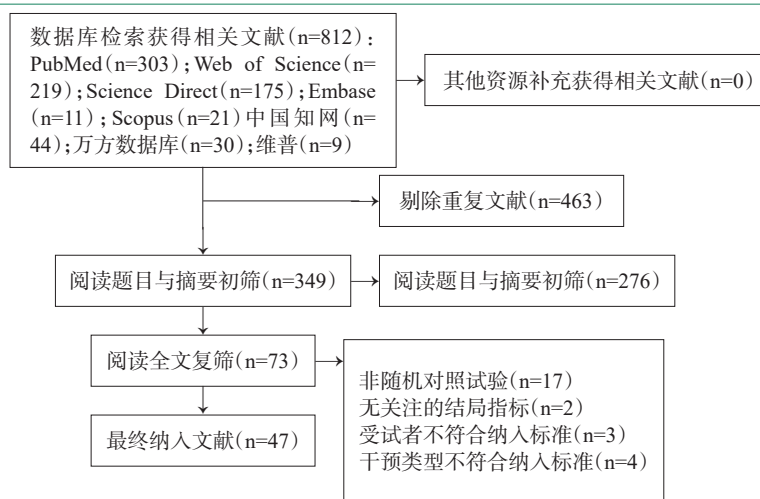
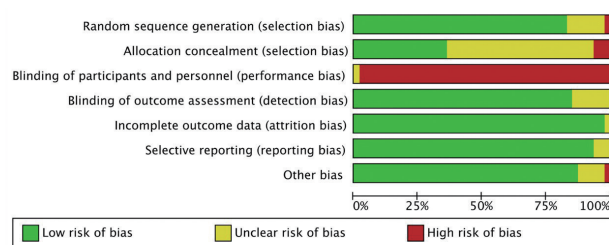


图 2 偏倚风险图



直接配对比较。在两两直接比较中,与对照组相比,除 RT: - 0.11 (- 2.20, 1.98) 干预外,所有运动干预均显著提高了 $VO_2\max$: HIIT: 3.98 (2.79, 5.16); MBT: 2.82 (0.72, 4.92); SSG: 3.01 (0.80, 5.22); CT: 2.96 (1.61, 4.31); AT: 2.84 (1.61, 4.06);此外,HIIT 的干预效果要优于 AT 干预效果(表 2)。

2.5 网状 meta 分析

与对照组相比,除 RT 外,其他运动干预方式均有显著性差异(见图 3D);网状 meta 分析结果显示, $VO_2\max$ SUCRA 排序为 HIIT>MBT>CT>SSG>AT(见图 3C)。

2.6 剂量反应网状 meta 分析

根据本研究数据特征,采用 E_{max} 函数模型拟合运动与 $VO_2\max$ 之间的剂量反应网状 meta 分析,其数学表达式如下^[11]:

$$f(x, E_{max,a}, ED_{50,a}) = \frac{E_{max,a}x}{ED_{50,a} + x}$$

其中, $E_{max,a}$ 代表在特定条件下,运动干预的最大效应。 $ED_{50,a}$ 代表半数有效剂量。

结果观察到总效应量趋势呈现“L 型”非线性剂量-反应关系(图 4),即在较低运动剂量范围内 $VO_2\max$ 提升较为迅速,而在剂量超过一定阈值后,增益效应趋于平台。通过进

表1 纳入文献的基本特征

纳入研究	国家	例数	性别	年龄 (岁)	是否 超重/肥胖	干预方式	干预周期 (周)	周频次	单次干预时长 (min)
Ajayaghosh, 2017 ^[33]	印度	CT: 15; MBT: 15	男	14—17	否	CT/MBT	12	5	60
Alberga, 2016 ^[36]	加拿大	AT: 75; CT: 75; RT: 78	男/女	14—18	是	AT/CT/RT	22	3	45—60
Alves, 2016 ^[35]	葡萄牙	RT: 41; CT: 38	男/女	10—11	否	RT/CT	8周	2	45
Amani-Shalamzari, 2019 ^[27]	伊朗	SSG: 12; CT: 12	男	18.6±0.5	否	SSG/CT	6周	3	45
Ángel Latorre-Román, 2021 ^[24]	西班牙	SSG: 58	男/女	8—12	否	SSG	10周	3	30
Benson, 2008 ^[42]	澳大利亚	RT: 37	男/女	12.2±0.13	否	RT	8周	2	60
Bhattacharyya, 2023 ^[19]	印度	MBT: 60	女	13—15	否	MBT	24周	5	60
Bouamra, 2022 ^[23]	突尼斯	CT: 13; RT: 12; HIIT: 12	男/女	12—14	是	CT/RT/ HIIT	9周	3	50—60
Chac, 2010 ^[41]	韩国	CT: 19	男/女	9—15	是	CT	12周	2	90
Chainok, 2022 ^[22]	泰国	HIIT: 12; CT: 12	女	12—18	是	HIIT/CT	8周	3	60
Chuensiri, 2018 ^[30]	泰国	HIIT: 15	男	8—12	是	HIIT	12周	3	16
D'Alleva, 2023 ^[18]	意大利	HIIT: 10; AT: 11	/	16.1±1.5	是	HIIT/AT	3周	5	30
D'Souza, 2014 ^[38]	印度	MBT: 46; CT: 45	/	7—9	否	MBT/CT	12周	5	45
Davis, 2011 ^[40]	美国	CT: 14	女	15.8±1.1	是	CT	16周	2	60—90
Dias, 2017 ^[29]	澳大利亚	HIIT: 17; AT: 24	男/女	7—16	是	HIIT/AT	12周	3	44
Gejl, 2024 ^[6]	丹麦	HIIT: 27; AT: 35	男/女	17.8±0.8	否	HIIT/AT	9周	3	30
George, 2005 ^[43]	英国	AT: 25	男/女	10.5±0.7	否	AT	12周	3	30
González-Gálvez, 2024 ^[17]	西班牙	HIIT: 20	/	仅提及青少年	否	HIIT	8周	2	12
Kennedy, 2017 ^[32]	澳大利亚	RT: 127	男/女	14.1±0.5	否	RT	10周	3	60
Li, 2024 ^[16]	中国	HIIT: 15; MBT: 16	女	18岁左右	否	HIIT/MBT	8周	3	60
Mandigout, 2002 ^[44]	法国	AT: 20; HIIT: 36	男/女	10—11	否	AT/HIIT	13周	3	25—35
Marta, 2013 ^[39]	葡萄牙	AT: 18	男/女	10.8±0.4	否	AT	8周	2	60
Martin-Smith, 2019 ^[26]	英国	HIIT: 22	男/女	16.5±0.5	否	HIIT	4周	3	25—33
Martínez-Vizcaino, 2022 ^[21]	西班牙	HIIT: 105	男/女	9—11	否	HIIT	24周	4	60
Meng, 2022 ^[20]	中国	HIIT: 12; AT: 11	男	11.2±0.7	是	HIIT/AT	12周	3	HIIT: 11; AT: 30
Satish, 2018 ^[25]	印度	MBT: 225	男/女	12—15	否	MBT	8周	7	60
Starkoff, 2014 ^[37]	美国	HIIT: 14; AT: 13	男/女	14.7±1.5	是	HIIT/AT	6周	3	40
Su, 2024 ^[5]	中国	HIIT: 22; AT: 22	男	14±1	是	HIIT/AT	8周	3	HIIT: 15; AT: 35
Wang, 2018 ^[28]	中国	SSG: 18	男	9—10	否	SSG	10周	3	60
曹莹, 2024 ^[45]	中国	HIIT: 12	男/女	12.3±0.5	是	HIIT	12周	3	18
李新, 2017 ^[31]	中国	AT: 20	男/女	平均年龄 12.7	否	AT	12周	5	30
谭思洁, 2016 ^[34]	中国	AT: 18	男	9—10	是	AT	10周	3	45
王凯, 2024 ^[4]	中国	CT: 20	女	14—16	是	CT	12周	5	50
Alonso-Fernández, 2019 ^[53]	西班牙	HIIT: 13	男/女	15—16	否	HIIT	7周	2	20
Boer, 2014 ^[57]	比利时	HIIT: 17; AT: 15	男/女	17±3	否	HIIT/AT	15周	2	30
Farpour-Lambert, 2009 ^[58]	瑞士	CT: 22	男/女	8.9±1.5	否	CT	24周	3	60
Gusmão, 2024 ^[48]	巴西	AT: 36	男/女	10—16	是	AT	8周	3	45
Kumari, 2017 ^[54]	印度	CT: 15	/	13—18	是	CT	3周	5—6	30
Moghaddam, 2016 ^[56]	伊朗	AT: 22	女	平均年龄 17	否	AT	12周	5	60
Ouergui, 2020 ^[51]	突尼斯	HIIT: 12	男/女	16±1	否	HIIT	4周	2	15
Philippot, 2019 ^[52]	比利时	HIIT: 14; AT: 13	/	9—11	否	HIIT/AT	5周	4	30
Philippot, 2022 ^[49]	比利时	CT: 20	男/女	13—17	否	CT	6周	3—4	50
Racil, 2024 ^[47]	突尼斯	HIIT: 12	女	14.4±1.4	是	HIIT	8周	3	40
Ullah, 2024 ^[46]	巴基斯坦	CT: 12	男/女	16—19	否	CT	12周	5	30
Vasconcellos, 2016 ^[55]	巴西	SSG: 10	男/女	12—17	是	SSG	12周	3	60
Xu, 2024 ^[45]	中国	SSG: 30	男/女	17—20	是	SSG	16周	3	60
Zhu, 2021 ^[50]	中国	AT: 48	男/女	18岁左右	否	AT	9周	4	60

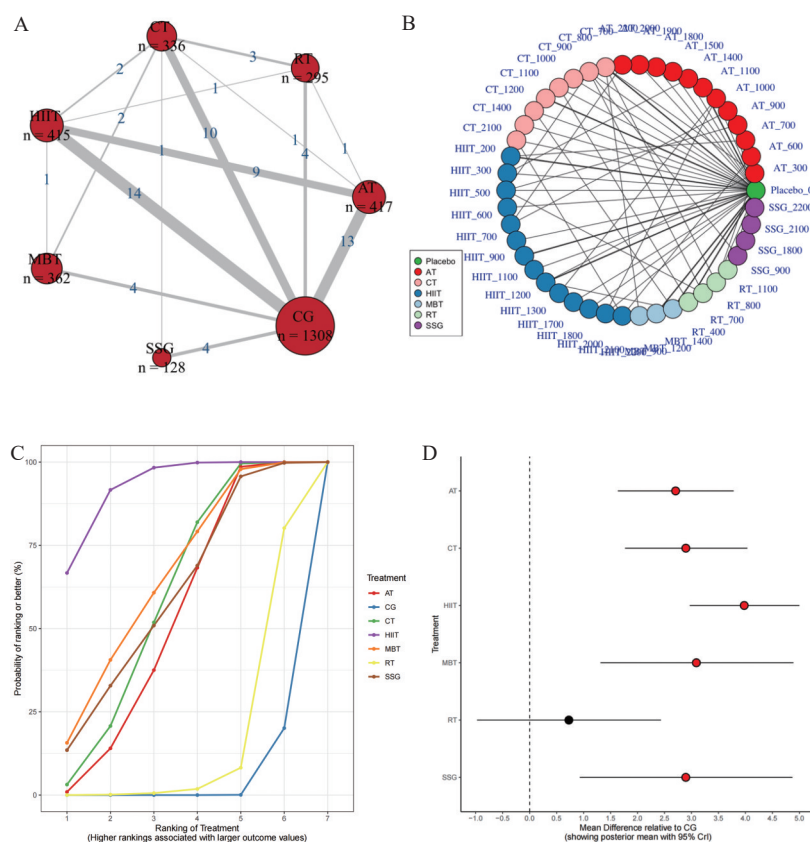
注: AT: 有氧训练(aerobic training); RT: 抗阻训练(resistance training); CT: 组合训练(combined training); HIIT: 高强度间歇训练(high-intensity interval training); MBT: 身心运动训练(mind-body training); SSG: 小场地运动训练(small-sided games); CG: 对照组(control group); /: 不清楚。

表2 传统配对meta分析

HIIT	0.20(- 4.32, 4.72)	0.03(-3.10, 3.16)	1.99(0.44, 3.55) ^①	0.40(- 3.70, 4.50)	3.98(2.79, 5.16) ^①
MBT		0.72(- 2.28, 3.72)			2.82(0.72, 4.92) ^①
SSG		- 0.40(- 4.74, 3.94)			3.01(0.80, 5.22) ^①
CT			- 1.20(- 5.22, 2.82)	1.55(- 0.81, 3.91)	2.96(1.61, 4.31) ^①
AT				1.90(- 2.12, 5.92)	2.84(1.61, 4.06) ^①
RT					- 0.11(- 2.20, 1.98)
CG					

注:AT:有氧训练(aerobic training);RT:抗阻训练(resistance training);CT:组合训练(combined training);HIIT:高强度间歇训练(high-intensity interval training);MBT:身心运动训练(mind-body training);SSG:小场地运动训练(small-sided games);CG:对照组(control group);^①组间干预效果差异 $P<0.05$ 。

图3 网状meta分析汇总



注:A 网状meta分析网络连接图(图中圆圈代表不同的干预措施,线条则表示干预措施之间的直接比较,其中线条粗细反映了对比这两种干预措施的研究数量);B 不同剂量网络连接图;C:SUCRA排序图,D 各运动干预网状森林图;AT:有氧训练(aerobic training);RT:抗阻训练(resistance training);CT:组合训练(combined training);HIIT:高强度间歇训练(high-intensity interval training);MBT:身心运动训练(mind-body training);SSG:小场地运动训练(small-sided games);CG:对照组(control group)

一步分析发现,总体运动剂量需达到672 METs-min/w,方可实现 VO_{2max} 的MCID(2.492ml/kg/min)。

不同运动类型中也观察到了与总体运动剂量类似的“L型”非线性剂量-反应关系(图5)。各运动方式达到MCID所需的最低剂量存在明显差异:本研究中,HIIT(MCID:3.701)

需达到531 METs-min/w,MBT(MCID:3.204)需达到1190 METs-min/w,CT(MCID:3.170)需达到1240 METs-min/w,SSG(MCID:3.492)需达到1700 METs-min/w,而AT(MCID:2.46)需达到970 METs-min/w以实现最小临床获益。RT则未显示出显著的剂量-反应关系或对应的临床获益剂量。

2.7 发表偏倚分析

利用漏斗图对纳入的47篇文献进行发表偏倚的评估,结果见图6。纳入研究大部分处于“倒漏斗”的中上位置,且左右大致对称,但可能存在一定程度的发表偏倚。

2.8 其他分析

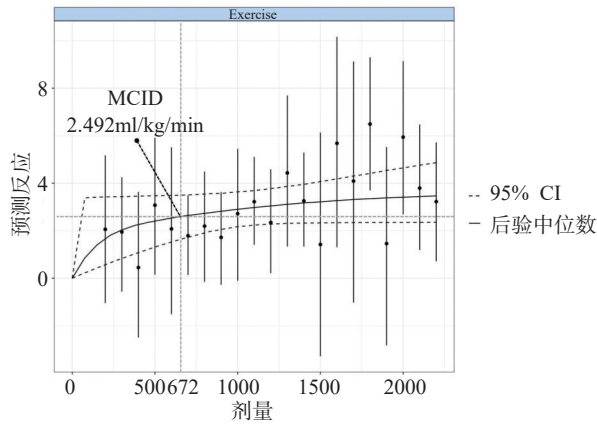
配对meta分析结果显示存在中等程度异质性($I^2=61\%$, $P<0.01$),提示干预效果可能受到某些特征变量的影响。因此,本研究进一步开展meta回归与亚组分析以探讨潜在的调节因素。meta回归结果显示,年龄、样本量、发表年份、干预周期、强度(METs)、周频率及单次干预时长均无显著调节效应(表3)。在此基础上,进一步对体质状态进行亚组分析,结果发现HIIT干预在肥胖儿童青少年中对 VO_{2max} 的改善效应显著更大($MD=0.17$, $P<0.05$)。此外,敏感性分析显示,在剔除高偏倚研究后主要结果仍保持稳定,说明本研究结论具有良好稳健性。

3 讨论

3.1 主要结果

运动干预能有效改善儿童及青少年的心肺适能^[2,4,36]。本研究结果显示,除RT外,所有运动干预均能显著改善

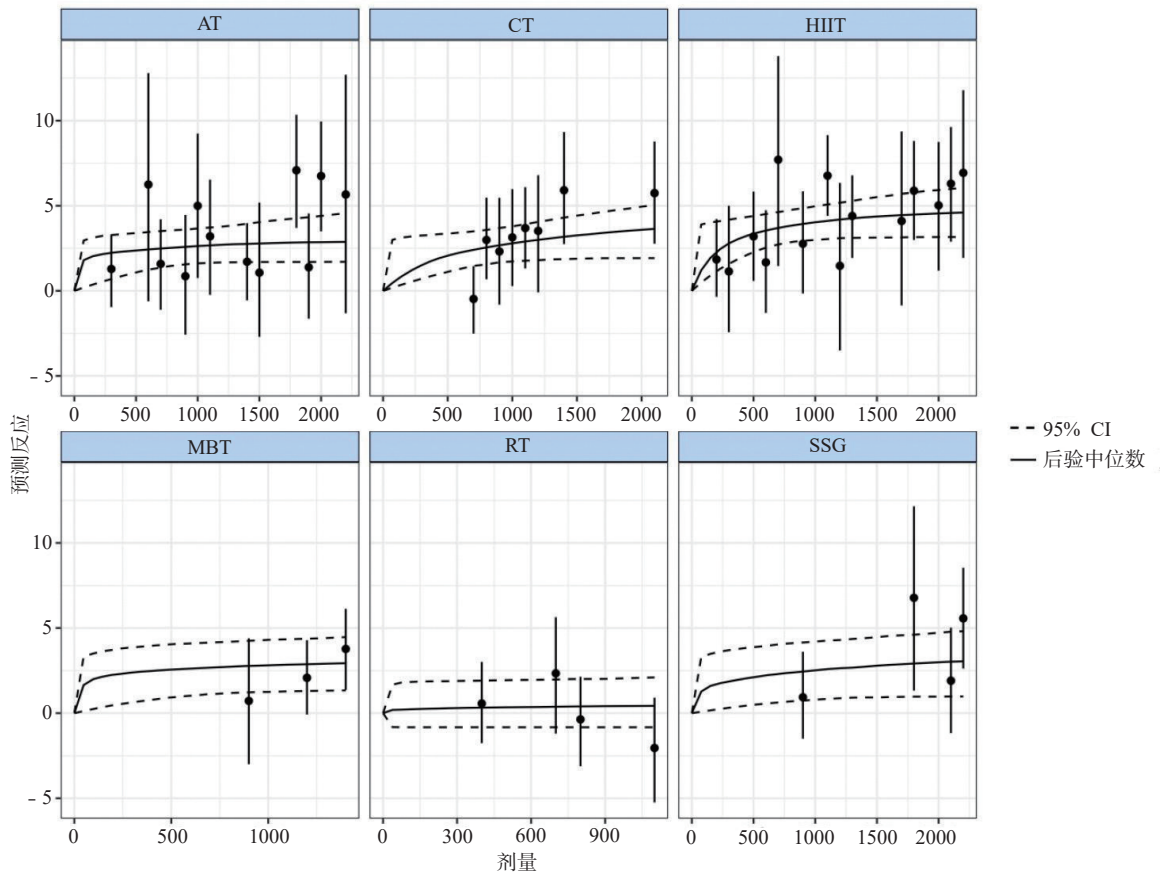
图4 总体运动剂量与 VO_2max 之间的“L型”非线性剂量-反应曲线



注:图中实线为后验中位数估计,虚线为95%置信区间。结果显示:在低剂量区间内 VO_2max 随剂量快速上升,呈陡峭增长趋势;而在高剂量区间,曲线趋于平台,提示效应增益递减的“L型”非线性特征(MCID最低临床显著变化值(minimal clinically important difference))

VO_2max , HIIT 运动展现出对 VO_2max 的最大改善效应。同时观察到总体运动剂量与 VO_2max 之间呈现“L型”非线性剂量-反应关系,其中最优化运动剂量为 2140 METs-min/w,而 HIIT 仅需 531 METs-min/w 即可达到临床显著效益。研究表明,AT 可通过增加骨骼肌毛细血管密度、改善心脏每搏输出量及提高血红蛋白含量,从而提升机体的有氧代谢能力^[59-60]。此外,AT 还能上调 AMPK、PGC-1 α 等关键信号通路,促进线粒体的生成和功能优化,从而提高 VO_2max ^[61]。而 RT 主要诱导 II 型肌纤维的选择性肥大,虽然显著提升了肌肉质量和神经肌肉功能,但由于 II 型纤维主要依赖无氧代谢供能,其有氧代谢能力相对较弱,因此 RT 对 VO_2max 的直接提升作用较为有限^[62]。特别是在初始 VO_2max 较高或以力量训练为主的人群中,其提升幅度微弱甚至不显著^[63]。若能与 AT 联合实施干预,可同时诱导 I 型与 II 型肌纤维的协同适应,从而在提升心肺耐力的同时维持或增强肌力,达到优化运动表现和整体健康的目的^[64]。HIIT 表现出显著的优越性,这可能是因为 HIIT 可显著激活交感神经系统,增强心脏收

图5 不同运动与 VO_2max 剂量反应关系图



注:图中展示有氧训练(AT)、复合训练(CT)、高强度间歇训练(HIIT)、混合训练(MBT)、阻力训练(RT)与小场比赛训练(SSG)在不同剂量下对 VO_2max 的预测效应。黑点表示实际观测值,虚线为95%置信区间,实线为后验中位数估计。

图6 发表偏倚图

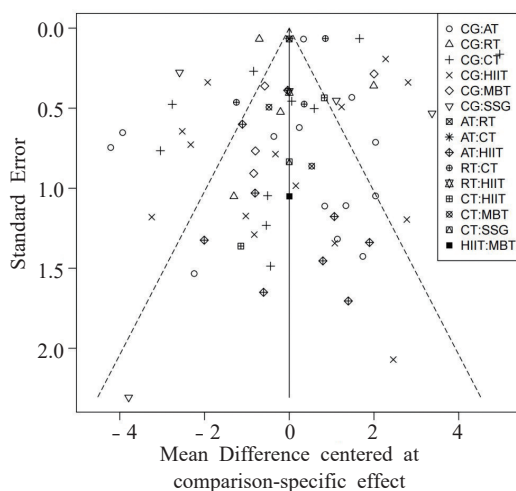


表3 单变量网状meta回归的模型拟合

协变量	DIC	pD	残差离差	β (中位数, 95% CI)
未调整模型	170.52	78.45	92.31	—
年龄	166.12	79.33	91.68	0.18 (- 0.55, 1.01)
发表年份	172.28	77.88	93.05	- 0.30 (- 1.12, 0.28)
样本量	168.19	78.22	92.13	0.32 (- 0.40, 1.05)
干预强度(METs)	164.97	78.41	91.99	1.03 (- 9.75, 9.98)
干预周期(周)	167.45	78.72	91.54	- 0.36 (- 1.25, 0.91)
单次干预时长(min)	167.92	78.14	91.75	- 0.78 (- 2.32, 0.62)
周频次(次/周)	169.56	77.96	91.89	- 1.05 (- 2.54, 0.42)

缩力,增加心排血量,并提高肌肉对氧的摄取和利用能力,最终促进 VO_2max 的改善^[29-30]。此外,HIIT的短时高强度特性可提高线粒体密度和氧化酶活性,优化有氧供能效率^[20]。有趣的是,MBT展现出仅次于HIIT的干预效果,其机制可能为通过调节自主神经系统平衡、心血管负荷、改善呼吸控制,从而增强心肺适能。研究表明,MBT干预可促进迷走神经活性,提高心率变异性,改善肺通气效率,最终提升 VO_2max ^[16]。

3.2 HIIT的优势

本研究确定了运动改善 VO_2max 的最低有效剂量为672 METs·min/w,这与世卫组织推荐的每日至少60min中高强度体力活动相呼应^[65],验证了世卫组织指南的有效性,帮助临床医师更好地理解这些建议的强度要求。同时,在不同运动干预的MCID分析中,HIIT所需剂量最低,显示出较其他干预更高的效率。已有研究证实了HIIT在改善 VO_2max 方面的有效性^[16],其高效性可能源于其独特的高强度间歇训练模式,该模式不仅在运动中极大地刺激心脏每搏输出量和肌肉氧摄取能力,还能显著提高运动后氧消耗,从而增加基础代谢率和线粒体氧化能力^[66-67]。HIIT通过交替的高强度爆发性运动和短暂恢复期,使心血管系统在短时间内承受较

高负荷,从而促进心脏适应性重塑,增强微循环,提高骨骼肌对氧的利用率^[68]。此外,HIIT的短时高效特点也使其更易为时间有限的个体接受。然而,也有研究对此结论提出异议,例如Boer等未发现HIIT对儿童 VO_2max 具有显著影响^[67],这一差异可能与研究对象不同有关,其研究仅涵盖儿童,而本研究纳入了儿童与青少年。此外,其采用标准化均差作为效应量,而本研究采用均差,二者在数据解释上可能存在差异。综上所述,尽管本研究强调了HIIT作为一种高效运动方式在改善 VO_2max 方面的潜力,但不同研究结果的差异也提示需要进一步研究,未来研究应探讨受试者特征(如年龄、基线 VO_2max 及体能水平)与运动方式间的相互作用,以明确在何种条件下HIIT及其他干预措施能获得最佳效果。

3.3 优势与局限

本研究具有以下优势:一是采用剂量反应网状meta分析,探讨了运动对 VO_2max 的影响,明确了运动的有效剂量及各干预方式的最佳剂量;二是采用MCID作为评估临床相关性的标准,增强了研究结果的临床应用价值。然而,本研究亦存在一定局限:一方面,不同运动的运动剂量测量方法及干预类型定义不统一,可能导致效应估计的偏差。另一方面,RT分析结果未达到统计学显著性,这可能是因为相关RT的研究过少所导致,在解释剂量预测结果时应谨慎。此外,在解释数据结果中是否存在比 E_{max} 函数更优的数学模型还存在一定疑问。

4 结论

除RT干预外,其余运动均可显著改善儿童青少年的 VO_2max ,其中HIIT干预改善效果最佳,且获得 VO_2max 有效改善效应的运动剂量需求最小;运动干预对 VO_2max 的提升存在非线性剂量关系,呈“L型”变化趋势。

参考文献

- [1] Rosenblat MA, Granata C, Thomas SG. Effect of interval training on the factors influencing maximal oxygen consumption: a systematic review and meta-analysis[J]. Sports Med, 2022, 52(6):1329—1352.
- [2] Nolte S, Rein R, Quittmann OJ. Data processing strategies to determine maximum oxygen uptake: a systematic scoping review and experimental comparison with guidelines for reporting[J]. Sports Med, 2023, 53(12):2463—2475.
- [3] Gabriel KP, Jaeger BC, Lewis CE, et al. Analysis of cardiorespiratory fitness in early adulthood and midlife with all-cause mortality and fatal or nonfatal cardiovascular disease [J]. JAMA Netw Open, 2023, 6(2):e230842.
- [4] Van Baak MA, Pramono A, Battista F, et al. Effect of different types of regular exercise on physical fitness in adults

- with overweight or obesity: Systematic review and meta-analyses[J]. *Obes Rev*, 2021, 22:e13239.
- [5] Su ZY, Yu WL, Yan ZW, et al. Comparison of high-intensity interval training and moderate-intensity continuous training on cardiopulmonary function, cardiac autonomic function and vascular function in adolescent boys with obesity: A randomized controlled trial[J]. *Eur J Sport Sci*, 2024, 24(12):1871—1882.
- [6] Gejl AK, Bugge A, Ernst MT, et al. Effects of 9 weeks of high- or moderate-intensity training on cardiorespiratory fitness, inhibitory control, and plasma brain-derived neurotrophic factor in danish adolescents: a randomized controlled trial[J]. *Scand J Med Sci Sports*, 2024, 34(8):e14703.
- [7] Crowley E, Powell C, Carson BP, et al. The effect of exercise training intensity on VO_2max in healthy adults: an overview of systematic reviews and meta-analyses[J]. *Transl. Sports Med*, 2022, 2022(1):9310710.
- [8] Wang C, Tian Z, Hu Y, et al. Physical activity interventions for cardiopulmonary fitness in obese children and adolescents: a systematic review and meta-analysis[J]. *BMC Pediatr*, 2023, 23(1):558.
- [9] Liang Z, Tian S, Wang C, et al. The best exercise modality and dose for reducing pain in adults with low back pain: a systematic review with model-based bayesian network meta-analysis[J]. *J Orthop Sports Phys Ther*, 2024, 54(5):315—327.
- [10] Be A. 2011 Compendium of Physical Activities: a second update of codes and MET values[J]. *Med Sci Sports Exerc*, 2011, 43:1575—1581.
- [11] Pedder H, Dias S, Boucher M, et al. Methods to assess evidence consistency in dose-response model based network meta-analysis[J]. *Stat Med*, 2022, 41(4):625—644.
- [12] Watt JA, Veroniki AA, Tricco AC, et al. Using a distribution-based approach and systematic review methods to derive minimum clinically important differences[J]. *BMC Med Res Methodol*, 2021, 21:1—7.
- [13] Howard R, Phillips P, Johnson T, et al. Determining the minimum clinically important differences for outcomes in the DOMINO trial[J]. *Int J Geriatr Psychiatry*, 2011, 26(8):812—817.
- [14] 王凯, 徐百超, 王朝昕, 等. 组合运动干预对肥胖女青少年身体成分、心血管风险因素及心肺适能影响的研究[J]. *中国全科医学*, 2024, 27(9):1109—1117.
- [15] 曹蕊, 于丰源, 邹昱, 等. 肥胖青少年间歇训练中的情感反应: 一项随机对照研究[J]. *中国运动医学杂志*, 2024, 43(7):527—536.
- [16] Li HM, Liu CJ, Shen YH, et al. High-intensity interval training vs. yoga in improving binge eating and physical fitness in inactive young females[J]. *Sci Rep*, 2024, 14(1):22912.
- [17] González-Gálvez N, López-Gil J F, Espeso-García A, et al. Effectiveness of high intensity and sprint interval training on metabolic biomarkers, body composition, and physical fitness in adolescents: randomized controlled trial[J]. *Front Public Health*, 2024, 12:1425191.
- [18] D'alleva M, Lazzer S, Tringali G, et al. Effects of combined training or moderate intensity continuous training during a 3-week multidisciplinary body weight reduction program on cardiorespiratory fitness, body composition, and substrate oxidation rate in adolescents with obesity[J]. *Sci Rep*, 2023, 13(1):17609.
- [19] Bhattacharyya S, Manna I. Impact of 24 weeks of yoga practice on body composition, physical fitness and cardiorespiratory variables of healthy adolescent female participants[J]. *Pak Heart J*, 2023, 56(2):1133—1141.
- [20] Meng C, Yucheng T, Shu L, et al. Effects of school-based high-intensity interval training on body composition, cardiorespiratory fitness and cardiometabolic markers in adolescent boys with obesity: a randomized controlled trial[J]. *BMC Pediatr*, 2022, 22(1):112.
- [21] Martínez-Vizcaino V, Soriano-Cano A, Garrido-Miguel M, et al. The effectiveness of a high-intensity interval games intervention in schoolchildren: A cluster-randomized trial[J]. *Scand J Med Sci Sports*, 2022, 32(4):765—781.
- [22] Chainok P, Kumsree N, Sonchan W. Effect of concurrent training and Muay Thai HIIT on body composition, physical fitness and functional movement in overweight adolescents: a randomized controlled trial[J]. *J Exerc Physiol Online*, 2022, 25(5):1—12.
- [23] Bouamra M, Zouhal H, Ratel S, et al. Concurrent training promotes greater gains on body composition and components of physical fitness than single-mode training (endurance or resistance) in youth with obesity[J]. *Front Physiol*, 2022, 13:869063.
- [24] Ángel Latorre-Román P, Berrios-Aguayo B, Aragón-Vela J, et al. Effects of a 10-week active recess program in school setting on physical fitness, school aptitudes, creativity and cognitive flexibility in elementary school children. A randomised-controlled trial[J]. *J Sports Sci*, 2021, 39(11):1277—1286.
- [25] Satish V, Rao RM, Manjunath NK, et al. Yoga versus physical exercise for cardio-respiratory fitness in adolescent school children: A randomized controlled trial[J]. *Int J Adolesc Med Health*, 2020, 32(3):20170154.
- [26] Martin-Smith R, Buchan DS, Baker JS, et al. Sprint interval training and the school curriculum: benefits upon car-

- diorespiratory fitness, physical activity profiles, and cardio-metabolic risk profiles of healthy adolescents[J]. *Pediatr Exerc Sci*, 2019, 31(3):296—305.
- [27] Amani-Shalamzari S, Khoshghadam E, Donyaei A, et al. Generic vs. small-sided game training in futsal: Effects on aerobic capacity, anaerobic power and agility[J]. *Physiol Behav*, 2019, 204:347—354.
- [28] Wang J, Cao L, Xie P, et al. Recreational football training improved health-related physical fitness in 9-to 10-year-old boys[J]. *J Sports Med Phys Fitness*, 2018, 58(3):326—331.
- [29] Dias KA, Ingul CB, Tjønnå AE, et al. Effect of high-intensity interval training on fitness, fat mass and cardiometabolic biomarkers in children with obesity: a randomised controlled trial[J]. *Sports Med*, 2018, 48(3):733—746.
- [30] Chuensiri N, Suksom D, Tanaka H. Effects of high-intensity intermittent training on vascular function in obese preadolescent boys[J]. *Child Obes*, 2018, 14(1):41—49.
- [31] 李新, 李晓彤, 王正珍, 等. 不同运动量对少年心肺耐力和身体成分影响的干预研究[J]. *中国体育科技*, 2017, 53(5):110—116.
- [32] Kennedy SG, Smith JJ, Morgan PJ, et al. Implementing resistance training in secondary schools: a cluster RCT[J]. *Med Sci Sports Exerc*, 2017, 50(1):62—72.
- [33] Ajayaghosh M, Mahadevan V. Effect of an hour physical activity and Koga on vital capacity and $\text{VO}_{2\text{max}}$ among adolescents[J]. *Int J Physiol, Nutr and Phys Educ*, 2017, 2(2):520—523.
- [34] 谭思洁, 郭振, 曹立全, 等. 9~10岁肥胖男童最大脂肪氧化强度运动减重处方的研究[J]. *体育科学*, 2016, 36(9):36—9+53.
- [35] Alves AR, Marta CC, Neiva HP, et al. Concurrent training in prepubescent children: The effects of 8 weeks of strength and aerobic training on explosive strength and $\text{VO}_{2\text{max}}$ [J]. *J Strength Cond Res*, 2016,30(7):2019—2032.
- [36] Alberga AS, Prud'homme D, Sigal RJ, et al. Effects of aerobic training, resistance training, or both on cardiorespiratory and musculoskeletal fitness in adolescents with obesity: the HEARTY trial[J]. *Appl Physiol Nutr Metab*, 2016, 41(3):255—265.
- [37] Starkoff BE, Eneli IU, Bonny AE, et al. Estimated aerobic capacity changes in adolescents with obesity following high intensity interval exercise[J]. *Int J Kinesiol Sports Sci*, 2014, 2(3):2202-946.
- [38] D'souza C, Avadhany ST. Effects of yoga training and detraining on physical performance measures in prepubertal children—a randomized trial[J]. *Indian J Physiol Pharmacol*, 2014, 58(1):61—68.
- [39] Marta CC, Marinho DA, Barbosa TM, et al. Effects of body fat and dominant somatotype on explosive strength and aerobic capacity trainability in prepubescent children[J]. *J Strength Cond Res*, 2013, 27(12):3233—3244.
- [40] Davis JN, Gyllenhammer LE, Vanni AA, et al. Startup circuit training program reduces metabolic risk in Latino adolescents[J]. *Med Sci Sports Exerc*, 2011,43(11):2195—2203.
- [41] Chae HW, Kwon YN, Rhie YJ, et al. Effects of a structured exercise program on insulin resistance, inflammatory markers and physical fitness in obese Korean children[J]. *J Pediatr Endocrinol Metab*, 2010, 23(10):1065—1072.
- [42] Benson AC, Torode ME, Fiatarone Singh MA. The effect of high-intensity progressive resistance training on adiposity in children: a randomized controlled trial[J]. *Int J Obes (Lond)*, 2008, 32(6):1016—1027.
- [43] George KP, Gates PE, Tolfrey K. The impact of aerobic training upon left ventricular morphology and function in pre-pubescent children[J]. *Ergonomics*, 2005, 48(11—14):1378—89.
- [44] Mandigout S, Melin A, Lecoq A, et al. Effect of two aerobic training regimens on the cardiorespiratory response of prepubertal boys and girls[J]. *Acta Paediatrica*, 2002, 91(4):403—408.
- [45] Xu Q, Qi K, Liu G, et al. Effects of a 16-week recreational small-sided games soccer intervention on body composition and physical fitness in sedentary young adults: A randomized controlled study[J]. *Heliyon*, 2024, 10(3):e25242.
- [46] Ullah Z, Ijaz S, Iqbal A. Effect of circuit training on maximum oxygen uptake ($\text{VO}_{2\text{max}}$) of adolescents[J]. *Sports Sci Phys Educ Rev*, 2024, 3(1): I—VIII.
- [47] Racil G, Aouichaoui C, Hawani A, et al. The impact of interval training on adiponectin to leptin ratios and on blood pressures in severely obese adolescent girls: A randomized controlled trial[J]. *J Sports Sci*, 2024, 42(10):884—892.
- [48] Gusmão TME, Medeiros CCM, Ferreira FRS, et al. Effectiveness of exergame on physical fitness of overweight adolescents: a clinical trial[J]. *Fisioterapia Brasil*, 2024, 25(2):1285—1300.
- [49] Philippot A, Dubois V, Lambrechts K, et al. Impact of physical exercise on depression and anxiety in adolescent inpatients: A randomized controlled trial[J]. *J Affect Disord*, 2022,301:145—153.
- [50] Zhu L, Yu Q, Herold F, et al. Brain structure, cardiorespiratory fitness, and executive control changes after a 9-week exercise intervention in young adults: a randomized

- controlled trial[J]. *Life*, 2021, 11(4):292.
- [51] Ouerghi I, Messaoudi H, Chtourou H, et al. Repeated sprint training vs. repeated high-intensity technique training in adolescent taekwondo athletes: a randomized controlled trial[J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2020, 17(12):4506.
- [52] Philippot A, Meerschaut A, Danneaux L, et al. Impact of physical exercise on symptoms of depression and anxiety in pre-adolescents: A pilot randomized trial[J]. *Front Psychol*, 2019, 10:1820.
- [53] Alonso-Fernández D, Fernández-Rodríguez R, Taboada-Iglesias Y, et al. Impact of a HIIT protocol on body composition and VO_2max in adolescents[J]. *Sci & Sports*, 2019, 34(5):341—347.
- [54] Kumari N, Tiwari S. Effect of 21 days of circuit training programme on maximal oxygen consumption (VO_2max) on pre-obese adolescents[J]. *IJAR*, 2017, 3(8):256—259.
- [55] Vasconcellos F, Seabra A, Cunha F, et al. Health markers in obese adolescents improved by a 12-week recreational soccer program: a randomised controlled trial[J]. *J Sports Sci*, 2016, 34(6):564—575.
- [56] Moghaddam S, Hashim HA, Abdullah MR, et al. The effects of supervised step aerobics training combined with daily milk consumption on muscle power and cardiovascular fitness in inactive girls: a randomised controlled trial [J]. *Int J Collab Res Intern Med Public Health*, 2016, 8(7):79—88.
- [57] Boer PH, Meeus M, Terblanche E, et al. The influence of sprint interval training on body composition, physical and metabolic fitness in adolescents and young adults with intellectual disability: a randomized controlled trial[J]. *Clin Rehabil*, 2014, 28(3):221—231.
- [58] Farpour-Lambert NJ, Aggoun Y, Marchand LM, et al. Physical activity reduces systemic blood pressure and improves early markers of atherosclerosis in pre-pubertal obese children[J]. *J Am Coll Cardiol*, 2009, 54(25):2396—2406.
- [59] Wang Z, Wang J. The effects of high-intensity interval training versus moderate-intensity continuous training on athletes' aerobic endurance performance parameters[J]. *Eur J Appl Physiol*, 2024, 124(8):2235—2249.
- [60] Soares RN, Lessard SJ. Low response to aerobic training in metabolic disease: role of skeletal muscle[J]. *Exerc Sport Sci Rev*, 2024, 52(2):47—53.
- [61] Arhen BB, Renwick J, Zedic A, et al. AMPK and PGC- α following maximal and supramaximal exercise in men and women: a randomized cross-over study[J]. *Appl Physiol Nutr Metab*, 2023, 49(4):526—538.
- [62] Kumari A, Gujral T, Sidiq M, et al. Effect of combined aerobic and resistance training exercise on VO_2max and BMI in overweight collegiate population a randomized controlled trial[J]. *J Bodyw Mov Ther*, 2025, 42:221—226.
- [63] Kelley GA, Kelley KS, Stauffer BL. Resistance training and inter-individual response differences on cardiorespiratory fitness in older adults: An ancillary meta-analysis of randomized controlled trials[J]. *Sci Prog*, 2024, 107(1):00368504241227088.
- [64] An J, Su Z, Meng S. Effect of aerobic training versus resistance training for improving cardiorespiratory fitness and body composition in middle-aged to older adults: A systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials [J]. *Arch Gerontol Geriatr*, 2024, 126:105530.
- [65] Bull FC, Al-Ansari SS, Biddle S, et al. World Health Organization 2020 guidelines on physical activity and sedentary behaviour[J]. *Br J Sports Med*, 2020, 54(24):1451—1462.
- [66] Clausen RD, Astorino TA. Excess post-exercise oxygen consumption after reduced exertion high-intensity interval training on the cycle ergometer and rowing ergometer[J]. *Eur J Appl Physiol*, 2024, 124(3):815—825.
- [67] Sturdy RE, Astorino TA. Post-exercise metabolic response to kettlebell complexes vs. high intensity functional training [J]. *Eur J Appl Physiol*, 2024, 124(12):3755—3766.
- [68] Sun Y, Park HY, Jung WS, et al. A comparison of continuous, interval, and accumulated workouts with equalized exercise volume: excess post-exercise oxygen consumption in women[J]. *BMC Womens Health*, 2024, 24(1):466.