

·循证医学·

中老年人执行功能的运动处方优化:贝叶斯视角下的剂量与形式整合证据*

陈继伟¹ 顾子苗¹ 晋世军¹ 王 静¹ 王 兴¹ 朱 昆^{1,2}

全球认知衰退人群正呈现迅速增长的趋势^[1],根据世界卫生组织(WHO)的估计,目前全球约有6000万人患有痴呆症,预计到2050年,患病人数将增至1.39亿^[2]。中老年人认知功能的下降容易导致工作记忆受损、决策能力减弱、注意力难以集中等多种执行功能问题,这不仅影响个体健康,还对家庭、社会及公共卫生系统构成了沉重压力^[3-4],因此早期识别和有效干预对于减缓中老年人认知衰退至关重要^[5]。

随着脑神经元逐渐减少,中老年人认知功能通常会随着年龄的增长而逐步下降^[6]。尽管中老年人的认知衰退往往具有不可逆性,但有效的早期干预能够显著减缓这一过程^[7]。执行功能作为认知功能的重要组成部分,相比其他认知功能,在中老年人自我调节、推理演绎等复杂认知任务中扮演着更加关键的角色,抗精神病药物虽然能显著改善执行功能的衰退,但其长期使用可能带来诸如焦虑、抑郁、肝肾功能异常、耐药反应等潜在风险^[8-10],有研究表明运动是缓解中老年人执行功能下降的有效手段,能够在不依赖药物的情况下改善大脑多方面健康,无论是长期还是短期干预,运动都具有较高的安全性和广泛的接受度^[6]。

既有研究表明,运动可改善中老年人执行功能,但最佳剂量范围、潜在效应拐点及标准化剂量依据仍不明确。现有研究多仅证实总体有效,缺乏统一剂量标准,且不同强度、频次、周期和时长的亚组分析也未在标准化运动剂量框架下开展,限制了结果解释。为弥补上述不足,本研究拟采用贝叶斯剂量反应网络meta分析^[11],系统整合临床试验数据,评估运动剂量对中老年人执行功能的剂量-反应效应,为科研与实践提供更精准依据。

1 研究方法

本研究严格遵循PRISMA2020指南,并已在PROSPERO预注册(CRD420250655408)。

1.1 检索策略

本研究系统检索PubMed、Cochrane Library、Web of

Science、Embase、CNKI、万方及中国生物医学文献数据库,检索时限截至2025年8月1日,并追溯近10年相关综述及原始研究参考文献。检索采用主题词与自由词结合的方式,覆盖标题、摘要和主题字段,并根据各数据库语法调整。正文仅以PubMed为例展示检索框架:population(老年人)、intervention(运动)、outcomes(执行功能),并结合临床试验或随机对照试验(RCTs)筛选。完整检索策略可向作者索取。文献筛选由两名研究者独立完成,分歧由第三位研究者协调解决。

1.2 文献纳入与排除标准

文献纳入标准依据PICOS框架制定:研究对象为平均年龄 ≥ 55 岁的健康中老年人,来自非临床人群,认知功能正常且无严重精神、神经、脑血管及肌肉骨骼疾病;干预为跑步、抗阻、骑行、瑜伽等运动,周期 ≥ 4 周^[12];对照包括常规干预或其他运动形式;结局指标至少涵盖工作记忆、认知灵活性或抑制控制之一;研究设计限于RCTs。

排除标准:为确保执行功能变化主要归因于运动干预,本研究排除运动联合非运动干预的研究,以及以特定生理或力学机制为核心、明显偏离常规训练实践的方案,如血流限制训练和等长、等速收缩训练。由于此类干预与常规运动在目标和实施范式上差异较大,难以进行横向比较,故未纳入分析。

1.3 数据提取

两名研究者独立提取数据,分歧经讨论解决。提取内容包括文献特征、受试者特征、运动方案、结局测量方法及效应量计算数据。缺失关键剂量信息时联系作者,未获回复则以同类运动的平均代谢当量(METs)补充。多臂研究中符合标准的各组均作为独立样本提取。

1.4 数据转换与管理

本研究先将干预划分为具体运动形式,并依据2024年版《成人身体活动汇编》^[13]和《老年人代谢当量汇编》^[14]统一换算为代谢当量(METs),再结合每周运动时间[单次时间 $\times$ 周频次]计算每周能量消耗(METs-min/w)^[15-16]。实际运动时间

DOI:10.3969/j.issn.1001-1242.2026.07.015

*基金项目:国家社会科学基金项目(22BTY076)

1 上海体育大学体育教育学院,上海市,200438; 2 通讯作者

第一作者简介:陈继伟,男,博士研究生; 收稿日期:2025-11-26

界定为剔除热身和放松后的正式训练时间。为便于网状meta分析并减少剂量分布过散对统计效力的影响,将能量消耗统一分为0(对照)、100、250、500、750、1000、1250和1500METs。

1.5 统计学分析

本研究采用随机效应贝叶斯模型网状meta分析(MBNMA)评估运动剂量与执行功能的剂量-反应关系,并在分析前检验网络连通性、一致性和传递性假设^[17]。效应量以标准化均值差(SMD;Hedges'g)及95%可信区间表示。根据观察结果,采用Emax、限制性三次样条、二次函数和非单调上升函数等模型进行拟合^[18],并结合偏差信息准则、研究间标准差、参数数量和残差等指标及偏差图进行比较^[19]。结果显示,二次函数拟合最佳,因此,用于评估非线性剂量反应关系;当95%CrI不跨0时认为差异具有显著性意义。所有分析在R4.4.2中完成,其中“MBNMAdose”用于MBNMA与剂量反应分析,“ggplot2”用于结果可视化。

1.6 偏倚风险和证据质量

三位研究人员对纳入文献进行了方法学风险偏倚和证据等级评估,方法学风险偏倚根据Cochrane风险偏倚工具(ROB 2.0)评估,证据等级评价使用GRADE系统。

2 结果

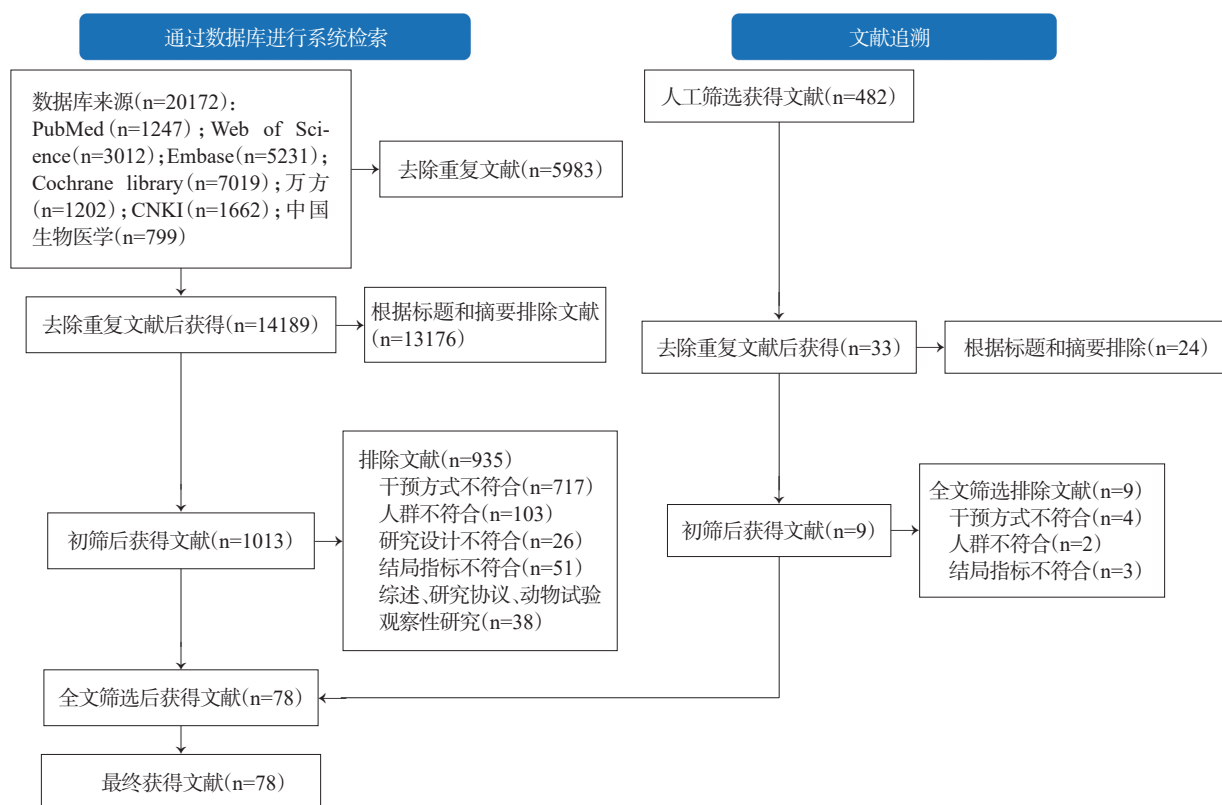
2.1 文献检索流程

通过7个电子数据库系统检索共获得20172篇文献。根据标题和摘要进行初筛后剩余1013篇,进一步阅读全文后共有78篇符合预设的纳入与排除标准。此外,我们对近10年相关综述的参考文献进行了人工追溯,最终纳入研究数仍为78篇。这些文献被用于本研究的定性与定量分析(因篇幅所限,完整的纳入研究列表可联系作者获取)。文献筛选流程见图1。

2.2 纳入研究特点

本研究共纳入78项RCT,涵盖6246例平均年龄 ≥ 55 岁的中老年受试者,均无高血压、II型糖尿病、认知障碍、抑郁症或神经系统疾病,且未服用抗精神类药物。11项研究仅包含单一性别,其余为男女混合样本。纳入研究涉及16种运动形式,包括骑行、舞蹈、高强度间歇运动(高强度间歇运动为本研究中唯一以间歇性为核心特征设计的运动形式,其余运动虽可能包含短暂休息或节奏变化,但整体结构上属于非间歇性、持续性运动)、综合有氧运动(指结合两种及以上有氧形式的干预)^[20]、多组分运动(指有氧与无氧相结合的多形式干预)^[21]、抗阻运动、平衡稳定性训练^[22]、拉伸运动、太极、虚拟现实运动、有氧健步走、水中运动、瑜伽、高尔夫、跑步和普拉提。依据《2024年成人身体活动汇编》和《老年人代谢当量

图1 文献纳入与筛选流程图



汇编》,运动强度对应的METs范围为2.3—11。

2.3 研究方法学评估

对78项纳入研究进行的方法学评价显示,大多数为中等风险;53项(67.95%)为中风险,8项(10.26%)为高风险。超过半数研究未明确报告随机化流程、分配隐藏或盲法实施。本研究仅纳入长期运动干预,且对照组多为常规生活方式,因此受试者与研究人员可能知晓干预内容,增加主观偏倚风险,导致在随机化偏倚和选择性报告偏倚两个条目上的评分偏低。

2.4 结果分析

2.4.1 运动剂量预测:结果表明当运动剂量达到830METs-min/w时,中老年人执行功能的改善效应处于相对较高水平(SMD=0.754,95% CrI=0.488,1.069),在830METs-min/w后改善效果逐渐降低,图2表明了WHO推荐中老年人每周进行至少150—300min的中等强度或75—150min的高强度运动^[23],以中等强度运动的平均METs为例(4METs-min),150—300min的运动等于600—1200METs-min/w。当总体运动剂量超过世界卫生组织推荐水平(即>1200METs-min/w)时,其对执行功能的改善效应预测低于较低运动剂量(如420METs-min/w)的改善效应。研究进一步对三项执行功能(认知灵活性、工作记忆和抑制控制)进行了剂量反应预测,结果显示,三者的预测反应值均随运动剂量的增加而显著上升,并在830METs-min/w附近达到峰值,与整合模型(总体执行功能)中效应水平相对较高的剂量区间保持一致,整体趋势表明三项执行功能在600—900METs-min/w的中高剂量区间内反应最为敏感,与WHO所推荐的中等强度身体活动剂量区间(600—1200METs-min/w)高度契合,提示该剂量范围可能在中老年人执行功能提升中具有良好适应性与潜在价值(图2)。

2.4.2 网状meta分析:本研究纳入的78项试验在受试者特

征、干预形式、对照条件、结局评估及设计方法上具有较高一致性,满足网状meta分析的相似性假设。全局不一致性检验未发现显著差异,支持整体一致性较强。节点劈裂法进一步评估不同运动形式与剂量的直接与间接比较,结果一致性良好,局部不一致性较小。

通过对不同运动形式及其剂量在执行功能改善方面的预测效应分析发现,太极在中等剂量水平(约690METs-min/w)时展现出相对较高的干预效应,进一步增加至830METs-min/w后,其改善效应趋于平台期或略有下降,提示其剂量-反应关系可能呈现中等剂量区间效应相对较高的特征。抗阻运动在580和670METs-min/w两个剂量点亦表现出相对较高的效应值,但在较低或更高剂量下,预测效应呈下降趋势,印证了其对剂量变化的敏感性,亦提示该干预形式的剂量-反应关系可能并非线性,中等剂量区间可能关联较高的干预效应。虚拟现实运动干预在中等偏低剂量范围内展现出较为显著的执行功能改善效应,提示该剂量区间可能为其干预效果的敏感阈值,相较之下,有氧健步走在相近剂量水平下的干预效应相对较弱,但仍表现出一定的执行功能改善潜力。总体来看,太极和抗阻运动在中等剂量水平下的干预效果最为显著,进一步支持“适中剂量优于高低极端剂量”的剂量效应模式。相关剂量反应趋势见图3。

表1展示了在150min中等强度和75min高强度运动条件下,各种运动形式所表现出的预测效果(对应WHO推荐中老年人每周最低体力活动时长,统一换算为METs-min/w),表中同时呈现了在最大预测效果对应剂量下的效果估计值及其95%可信区间(95% CrI),以比较不同运动形式在推荐剂量水平与剂量-反应模型中效应相对较高的剂量区间下对执行功能改善程度的差异。

表1 不同运动形式在推荐剂量与最大剂量下的预测效应

运动形式(METs)	WHO推荐最低剂量下的预测效应		最大预测效果剂量下的预测效应	
	推荐剂量(实际预测剂量, METs·min/w)	Mean(95% CrI)	剂量 (METs·min/w)	Mean(95% CrI)
平衡稳定性运动(2.3)	345(390)	0.693(0.166,1.243)	330	0.742(0.260,1.237)
持续性中强度骑行(5.3)	795(890)	0.547(-0.052,1.115)	1000	0.762(-0.039,1.537)
舞蹈(6.3)	945(970)	0.516(-0.098,1.130)	1200	0.697(-0.382,1.773)
高强度间歇骑行(7.0)	525(560)	0.325(-1.045,1.719)	1200	0.465(-0.689,1.636)
综合有氧运动(6.0) ^①	900(1000)	0.198(-0.583,0.956)	560	0.819(0.371,1.282)
多组分运动(4.5)	675(690)	0.499(0.190,0.846)	690	0.499(0.190,0.846)
抗阻运动(3.0) ^②	450(500)	1.100(0.603,1.606)	580	1.128(0.586,1.683)
拉伸运动(2.3)	345(390)	0.258(-0.135,0.673)	500	0.483(-0.080,1.032)
太极(3.8)	570(690)	1.193(0.769,1.633)	690	1.193(0.769,1.633)
虚拟现实运动(5.5)	825(750 [*])	0.678(-0.031,1.360)	500	1.157(0.257,2.083)
有氧健步走(4.5)	675(750)	0.899(-0.001,1.806)	580	0.902(0.265,1.558)
水中运动(5.8)	870(750 [*])	0.610(-0.626,1.849)	500	0.726(-0.068,1.563)
瑜伽(2.5)	375(390)	0.575(0.071,1.122)	500	0.576(0.148,1.027)

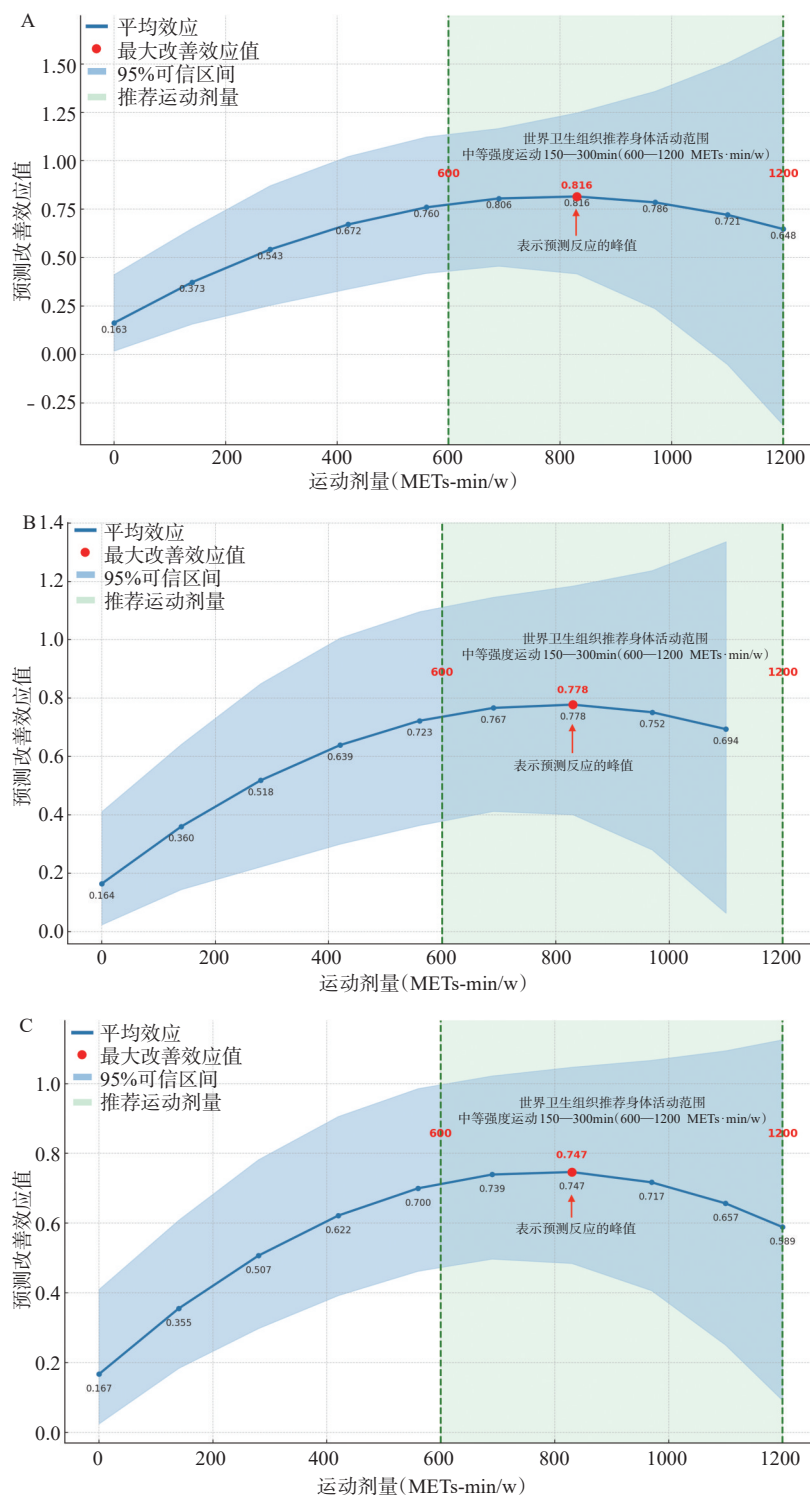
注:推荐剂量指WHO推荐最低体力活动量换算后的剂量;括号内为模型中与推荐剂量最接近的实际预测剂量;Mean为预测效应值,CrI为可信区间;*表示该运动形式在模型可预测剂量范围内未覆盖WHO推荐最低剂量,因此采用模型可预测范围内最接近推荐剂量的剂量点进行展示。①综合有氧运动采用本研究纳入该类干预的平均METs值;②抗阻运动采用中等强度抗阻运动的典型METs值。

3 讨论

3.1 关键发现

本研究系统探讨了不同运动形式及其剂量对中老年人执行功能的影响,结果显示,执行功能的改善与运动剂量之

图2 运动对中老年人认知灵活性、工作记忆、抑制控制改善效果的运动剂量预测

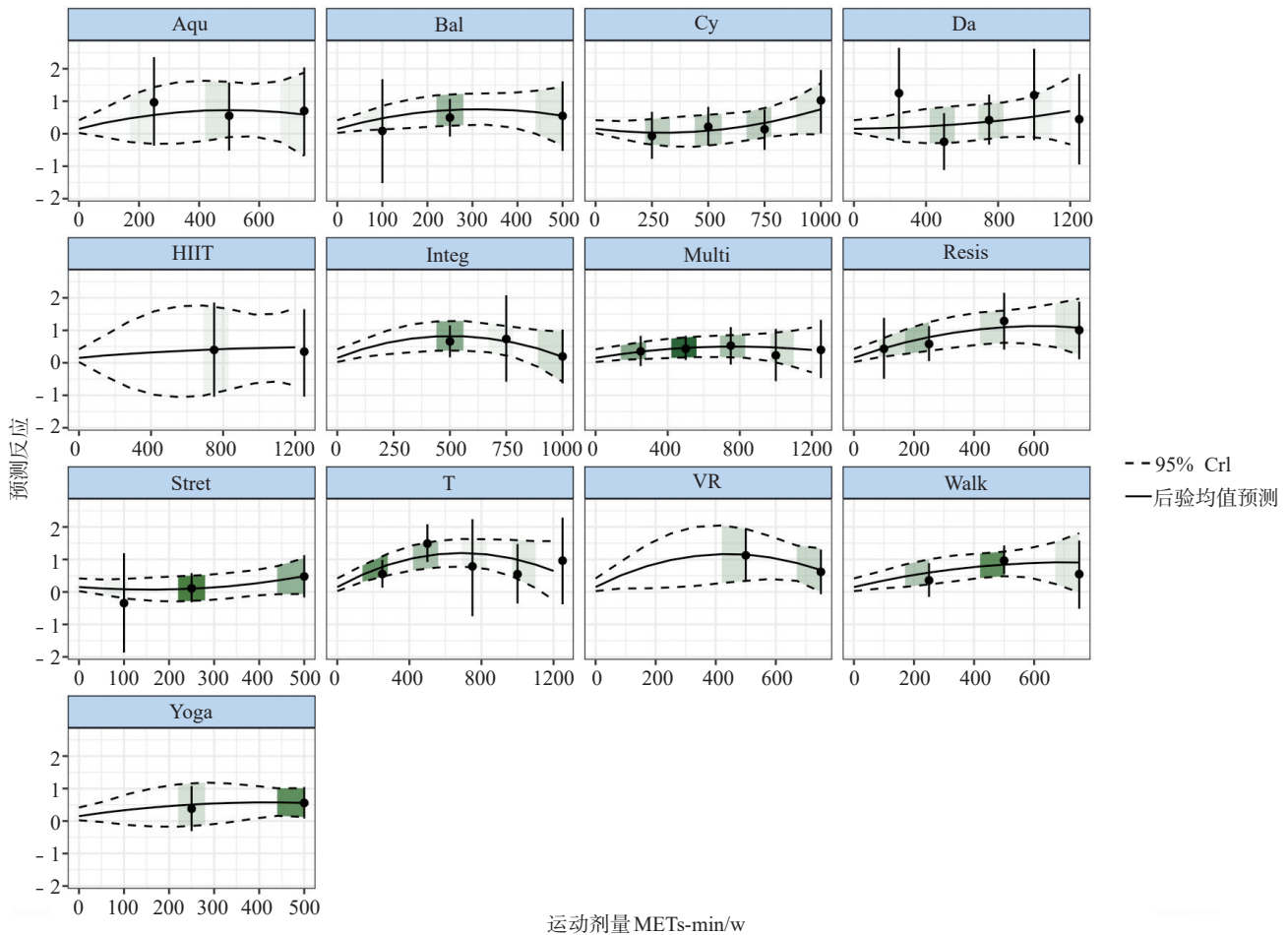


间存在非线性关系,在 830METs-min/w 附近达到干预效果峰值,随后效益逐渐减弱。进一步分析认知灵活性、工作记忆、抑制控制亦表明,其改善趋势在 600—900METs-min/w 的中高剂量区间最为敏感,与整合模型所提示的效应水平相对较高的剂量点一致,提示该剂量范围在中老年人执行功能促进中具有较高的适应性与实用价值。这一结果与 WHO 关于中等强度身体活动的推荐标准高度契合,但亦指出,超过某一剂量阈值后干预效应可能趋于平稳甚至轻微下降,例如,970 与 560METs-min/w 的改善幅度相近,1200METs-min/w 的效果则接近 420METs-min/w 的水平,说明“更多并非总是更好”,虽然 WHO 指南明确指出运动相较于不运动具有更显著的健康效益^[23],但本研究结果进一步强调,在制定运动干预方案时应关注剂量控制的临床意义。不同运动形式在剂量响应特征上的差异进一步凸显了干预类型选择的重要性,研究发现,太极与抗阻训练在 500—830METs-min/w 区间内具有稳定且显著的干预效应,其可信区间完全位于正向区间,说明该类运动在接近剂量阈值时的表现更为稳健,而虚拟现实运动在低于 WHO 推荐剂量 (<600 METs-min/w) 下即表现出较强响应,特别是在 500METs-min/w 时达到峰值,提示其具备良好的低剂量响应特性,可能更适合无法承担高负荷运动的中老年群体,相比之下,有氧健步走在 580METs-min/w 时的干预效果相对有限,显示出在剂量不足时其增益空间受限。

3.2 运动剂量与中老年人认知机制之间的潜在关联

运动训练被认为是提高认知能力的有效手段之一,运动对认知功能的改善不仅通过直接影响神经递质和神经营养因子的表达,还通过多种机制促进大脑健康^[24]。具体到中老年人执行功能的改善,研究提示其促进作用可能源于一系

图3 各类运动形式的剂量反应关系预测曲线



注: Aqu: 水中运动; Bal: 平衡稳定性运动; Cy: 骑行; Da: 舞蹈; HIIT: 高强度间歇运动; Integ: 综合有氧运动; Multi: 多组分运动; Resis: 抗阻运动; Stret: 拉伸运动; T: 太极; VR: 虚拟现实运动; Walk: 有氧健步走; Yoga: 瑜伽; 普拉提、跑步及高尔夫运动因仅有单项研究纳入, 相关剂量数据不足, 未能进行有效的剂量反应预测分析。

列复杂的生物学过程, 其中多个机制的激活可能受到运动剂量的调节, 已有研究表明, 运动可刺激骨骼肌、脂肪、肝脏及脑组织分泌多种运动因子, 这些因子通过外周与中枢神经系统之间的交互作用, 有助于改善神经元线粒体功能障碍, 从而推动执行功能的提升^[25]。这一过程中, 适当剂量的运动或是诱导运动因子释放、触发神经调节效应的必要条件, 此外, 运动对执行功能的影响还可在分子水平上体现: 相关研究指出, 运动可通过调节胰岛素与葡萄糖信号、缓解氧化应激与慢性炎症反应, 改善大脑整体代谢与结构状态^[26]。上述通路的启动与持续, 可能对运动剂量的阈值或负荷范围具有一定依赖性, 在有关运动干预对中老年人执行功能改善的研究中, 提高大脑唤醒水平与前额叶激活程度被认为至关重要^[27], 尤其是在中低强度运动条件下, 其对背外侧前额叶皮质与额极区的激活作用更为显著, 这一发现亦从神经功能响应的角度间接反映了运动剂量的关键性作用, 增强激活水平的同时, 前额叶相关脑区

之间的功能连接亦得到优化, 进而支持工作记忆与认知灵活性等执行功能的发挥, 此外, 运动还被证实可促进神经可塑性, 尤其是在关键记忆结构海马体中, 增强神经发生与突触重构, 而神经可塑性的形成过程可能对累积运动刺激剂量具有一定的时间-负荷依赖性^[28], 同时, 运动有助于减少海马区域的慢性炎症, 而慢性炎症被认为是导致认知衰退的主要机制之一, 因此, 维持在适宜剂量水平的运动干预, 在执行功能的延缓衰退与积极提升中具有潜在的长期价值^[29]。

4 结论

本研究基于贝叶斯剂量-反应建模与网状 meta 分析, 评估了不同运动形式与剂量水平对健康中老年人执行功能的影响。结果显示, 运动干预与执行功能改善之间呈现非线性的剂量-反应关系, 在约 830 METs-min/w 附近对应较高的效应水平。不同运动形式的剂量-反应特征存在差异, 其中太极与抗

阻运动在中等剂量区间表现出相对较高的改善效应,共同刻画了运动形式与剂量在执行功能改善中的差异化作用特征。

参考文献

- [1] Dominguez LJ, Veronese N, Vernuccio L, et al. Nutrition, physical activity, and other lifestyle factors in the prevention of cognitive decline and dementia[J]. *Nutrients*, 2021, 13(11): 4080.
- [2] 2023 the Alzheimer's Association. 2023 Alzheimer's disease facts and figures[J]. *Alzheimers & Dementia*, 2023, 19(4): 1598—1695.
- [3] Al-Molegi A, Martinez-Balleste A. SafeMove: monitoring seniors with mild cognitive impairments using deep learning and location prediction[J]. *Neural Computing & Applications*, 2022, 34(19): 16785—16803.
- [4] Raffin J, Rolland Y, Fisher C, et al. Cross-sectional associations between cortical thickness and physical activity in older adults with spontaneous memory complaints: The MAPT Study[J]. *Journal of Sport and Health Science*, 2023, 12(3): 324—332.
- [5] 2024 the Alzheimer's Association. 2024 Alzheimer's disease facts and figures[J]. *Alzheimer's & Dementia*, 2024, 20(5): 3708—3821.
- [6] 蔡治东, 江婉婷, 王兴. 弹力带抗阻运动对高龄老年人工作记忆的影响: 来自fNIRS的证据[J]. *上海体育大学学报*, 2024, 48(3): 65—74.
- [7] 尹丽琴, 汤长发, 罗伟强, 等. 多模式运动对轻度认知功能障碍老年人认知功能和神经可塑性的影响[J]. *体育科学*, 2022, 42(1): 78—87+97.
- [8] Tricco AC, Ashoor HM, Soobiah C, et al. Comparative effectiveness and safety of cognitive enhancers for treating Alzheimer's disease: systematic review and network metaanalysis[J]. *J Am Geriatr Soc*, 2018, 66(1): 170—178.
- [9] Knight R, Khondoker M, Magill N, et al. A systematic review and meta-analysis of the effectiveness of acetylcholinesterase inhibitors and memantine in treating the cognitive symptoms of dementia[J]. *Dement Geriatr Cogn Disord*, 2018, 45(3—4): 131—151.
- [10] Chen JW, Du WQ, Zhu K. Network meta-analysis of the effects of different cognitive trainings on the cognitive function of patients with mild cognitive impairment[J]. *J Psychiatr Res*, 2024, 174: 26—45.
- [11] Swinton PA, Schoenfeld BJ, Murphy A. Dose-response modelling of resistance exercise across outcome domains in strength and conditioning: a meta-analysis[J]. *Sports Medicine*, 2024, 54(6): 1579—1594.
- [12] Lin MR, Ma CY, Zhu JF, et al. Effects of exercise interventions on executive function in old adults with mild cognitive impairment: A systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials[J]. *Ageing Research Reviews*, 2022, 82.
- [13] Herrmann SD, Willis EA, Ainsworth BE, et al. 2024 adult compendium of physical activities: a third update of the energy costs of human activities[J]. *Journal of Sport and Health Science*, 2024, 13(1): 6—12.
- [14] Willis EA, Herrmann SD, Hastert M, et al. Older adult compendium of physical activities: energy costs of human activities in adults aged 60 and older[J]. *Journal of Sport and Health Science*, 2024, 13(1): 13—17.
- [15] Wasfy MM, Baggish AL. Exercise dose in clinical practice[J]. *Circulation*, 2016, 133(23): 2297—2313.
- [16] Ainsworth BE, Haskell WL, Herrmann SD, et al. 2011 compendium of physical activities[J]. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 2011, 43(8): 1575—1581.
- [17] White IR, Barrett JK, Jackson D, et al. Consistency and inconsistency in network meta-analysis: model estimation using multivariate meta-regression[J]. *Research Synthesis Methods*, 2012, 3(2): 111—125.
- [18] Pedder H, Dias S, Bennetts M, et al. Modelling time-course relationships with multiple treatments: Model-based network meta-analysis for continuous summary outcomes[J]. *Research Synthesis Methods*, 2019, 10(2): 267—286.
- [19] Evans NJ. Assessing the practical differences between model selection methods in inferences about choice response time tasks[J]. *Psychonomic Bulletin & Review*, 2019, 26(4): 1070—1098.
- [20] Ye M, Song T, Xia H, et al. Effects of aerobic exercise on executive function of healthy middle-aged and older adults: A systematic review and meta-analysis[J]. *International Journal of Nursing Studies*, 2024, 160: 104912.
- [21] Yan J, Li X, Guo X, et al. Effect of multicomponent exercise on cognition, physical function and activities of daily life in older adults with dementia or mild cognitive impairment: a systematic review and meta-analysis[J]. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 2023, 104(12): 2092—2108.
- [22] Guzel I, Can F. The effects of different exercise types on cognitive and physical functions in dementia patients: A randomized comparative study[J]. *Archives of Gerontology and Geriatrics*, 2024, 119: 105321.
- [23] Bull FC, Al-Ansari SS, Biddle S, et al. World Health Organization 2020 guidelines on physical activity and sedentary behavior[J]. *British Journal of Sports Medicine*, 2020, 54(24): 1451—1462.
- [24] Xiong J, Ye M, Wang L, et al. Effects of physical exercise on executive function in cognitively healthy older adults: A systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials: Physical exercise for executive function[J]. *International Journal of Nursing Studies*, 2021, 114: 103810.
- [25] 胡帅, 武心茹, 邢建强, 等. 运动因子对神经元线粒体功能障碍的改善作用及机制[J]. *中国体育科技*, 2024, 60(6): 61—72.
- [26] Erickson KI, Hillman C, Stikman CM, et al. Physical activity, cognition, and brain outcomes: a review of the 2018 physical activity guidelines[J]. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 2019, 51(6): 1242—1251.
- [27] 蔡治东, 舒展, 王兴, 等. 急性弹力带运动对高龄老年人工作记忆的影响: 来自fNIRS的证据[J]. *中国体育科技*, 2023, 59(9): 46—53.
- [28] 牟连伟, 韩鹏, 杨运杰. 运动干预调控海马神经元自噬改善阿尔茨海默病模型小鼠学习记忆障碍[J]. *解剖学报*, 2024, 55(5): 533—540.
- [29] Maryam K, Ali H. Aerobic and resistance exercises affect the BDNF/TrkB signaling pathway, and hippocampal neuron density of high-fat diet-induced obese elderly rats[J]. *Physiology & Behavior*, 2023, 264: 114140.