doi:10.3969/j.issn.1001-4616.2026.05.015

有氧运动对中老年人不同部位骨密度影响的系统评价与 Meta 分析

谢　航[1],陈　如[2],林文鑫[1],李婷文[1],张　健[1,3]

(1.闽南师范大学体育学院,福建 漳州 363000)
(2.福建师范大学体育科学学院,福建 福州 350117)
(3.华东师范大学体育与健康学院,上海 200241)

[**摘要**]　通过系统评价有氧运动对中老年人不同部位骨密度(BMD)的影响,从而为中老年人制定针对性运动处方、减少骨量流失和预防骨质疏松提供科学依据. 系统检索 PubMed、Web of Science、Cochrane Library、Embase、CNKI、万方数据库和中国生物医学数据库(CBM)从建库至 2025 年 12 月 20 日收录的相关随机对照试验,并采用 RevMan 5.4 软件进行 Meta 分析. 最终纳入 10 篇文献,共 917 名受试者. 结果显示,与对照组相比,试验组腰椎骨密度(MD=0.02,95%CI:0.01~0.03,P=0.0005)、股骨颈骨密度(MD=0.02,95%CI:0.00~0.040 0,P=0.040 0)和全身骨密度(MD=0.02,95%CI:0.01~0.03,P=0.004 0)均显著提高;而大转子骨密度(MD=0.01,95%CI:-0.01~0.03,P=0.35)与髋部骨密度(MD=0.00,95%CI:-0.01~0.01,P=0.910 0)的差异无统计学意义. 上述结果表明,有氧运动能有效改善中老年人腰椎、股骨颈及全身骨密度,对承重部位和全身骨骼产生积极影响,但对大转子和髋部骨密度的改善效果尚不明确,提示干预效应存在部位特异性.

[**关键词**]　有氧运动,骨密度,骨质疏松,中老年人,Meta 分析
[**中图分类号**]G804.2;R580　[**文献标志码**]A　[**文章编号**]1001-4616(2026)05-0142-11

Systematic Review and Meta-Analysis of the Effects of Aerobic Exercise on Bone Mineral Density in Different Body Parts of Middle-Aged and Elderly Adults

Xie Hang[1],Chen Ru[2],Lin Wenxin[1],Li Tingwen[1],Zhang Jian[1,3]

(1.School of Physical Education,Minnan Normal University,Zhangzhou 363000,China)
(2.School of Sports Science and Physical Education,Fujian Normal University,Fuzhou 350117,China)
(3.College of Physical Education and Health,East China Normal University,Shanghai 200241,China)

Abstract:This study systematically evaluated the effects of aerobic exercise on bone mineral density(BMD)at different skeletal sites in middle-aged and elderly adults,and aimed to provide scientific evidence for formulating targeted exercise prescriptions,reducing bone loss and preventing osteoporosis. All relevant randomized controlled trials published from the inception of each database to December 20,2025 were retrieved from PubMed,Web of Science,Cochrane Library,Embase,CNKI,Wanfang Database and China Biomedical Literature Database(CBM). Meta-analysis was conducted using RevMan 5.4 software,and a total of 10 eligible studies involving 917 participants were included. The results showed that compared with the control group,aerobic exercise intervention significantly increased the BMD of the lumbar spine(MD=0.02,95%CI:0.01~0.03,P=0.0005),femoral neck(MD=0.02,95%CI:0.00~0.040 0,P=0.040 0)and total body(MD=0.02,95%CI:0.01~0.03,P=0.004 0). By contrast,no statistically significant differences were found in the BMD of the greater trochanter(MD=0.01,95%CI:-0.01-0.03,P=0.350 0)and hip(MD=0.00,95%CI:-0.01~0.01,P=0.910 0). In conclusion,aerobic exercise can effectively improve the BMD of the lumbar spine,femoral neck and total body in middle-aged and elderly adults,which exerts positive effects on weight-bearing bone status and overall skeletal health. However,

收稿日期:2026-03-11.
基金项目:国家社科基金重大项目(21&ZD341)、教育部人文社会科学基金项目(24YJCZH145)、闽南师范大学研究生教育教学改革项目(YJG202512).
通讯作者:李婷文,博士,讲师,研究方向:运动技术评估与优化. E-mail:litingwen19890702@126.com;张健,博士,教授,研究方向:人体运动与健康促进. E-mail:zhangjian0601013@126.com

aerobic exercise has no definite improvement effect on the BMD of the greater trochanter and hip, suggesting that the regulatory effect of aerobic exercise on bone density is site-specific.

Key words: aerobic exercise, bone density, osteoporosis, middle-aged and elderly adults, Meta-analysis

骨密度(bone mineral density,BMD)是衡量骨骼健康状况的关键指标,骨密度值低将导致骨质疏松症及相关骨折风险上升. 其病理基础是骨量减少和骨组织微结构退化,导致骨骼的机械强度下降,脆性增加,即使在轻微外力作用下也极易发生骨折[1]. 骨密度的数值变化与个体的年龄紧密相关,老年期是骨密度快速下降的显著阶段,骨质疏松、骨折风险骤升[2]. 因此,探索安全、有效且易于推广的非药物干预措施以维持或提高中老年人的骨密度,对于延缓骨质流失、预防骨折具有至关重要的临床与社会意义.

在众多非药物干预手段中,体育锻炼被广泛认为是维持和改善骨骼健康的重要策略[3]. 其中,有氧运动因其强度适宜、形式多样、易于实施且对心血管系统有益而备受推崇[4-5]. 有氧运动可通过多重机制影响骨代谢,如通过周期性负荷刺激骨骼适应性重建;提升血流灌注,促进营养与激素输送;调节生长因子(IGF-1)、降低炎症因子水平,从而抑制骨吸收[6-7]. 然而,关于有氧运动对中老年人骨密度影响的前期成果,仅有部分研究显示有氧运动对中老年人骨密度的改善具有显著效果[8-9]. 但需要注意的是,现有关于有氧运动在临床治疗中应用效果的研究,其结论尚不一致[10-11]. 这类研究在方案设计、受试对象、干预参数及疗效评价指标等方面存在一定的异质性,所使用的评估工具和观测指标也较为多样,若仅依据个别文献的结果报告,或只关注单一指标的显著变化,便试图论证该运动方法的整体临床价值,则其论证依据和结论的可靠性不免让人存疑. 本研究旨在通过多方面搜集与综合分析相关文献,系统评估有氧运动对改善中老年人骨密度的干预效果,并尝试从生物力学与代谢交互视角探讨其潜在机制,为临床医生和公共卫生政策制定者提供科学依据,指导中老年人进行科学、有效的有氧运动,以预防中老年人骨质疏松症和减少骨量流失,提高生活质量.

1　资料与方法

1.1　研究架构

研究设计遵循 PRISMA 指南,PICO 架构见表 1.

表 1　PICO 框架

Table 1　PICO framework

人群	干预	比较	结论
中老年人	有氧运动 干预形式:慢跑、太极拳、健身操、自行车、跑步机; 干预方案:干预周期、干预频率、干预时长	有氧运动与正常生活方式或简单身体活动(拉伸、减重)或服用钙和维生素比较	腰椎骨密度;股骨颈骨密度;大转子骨密度;全身骨密度;全髋骨密度

1.2　纳入标准

研究设计:随机对照实验(randomized controlled trial,RCT). 受试对象:国内外接受有氧运动干预的中老年受试者,运动功能障碍或血液系统疾病者均排除在外. 干预措施:有氧运动定义为以大肌群参与、持续节奏性、强度适中为主的运动形式,包括但不限于快走、慢跑、太极拳、有氧舞蹈、固定自行车等. 干预时长与频率:干预时长≥3 个月,且运动频率≥2 次/周、每次时长≥30 min. 结局指标:腰椎(Lumber Spine,LS)、股骨颈(Femoral Neck,FN)和股骨大转子(Troch)、全髋骨密度(Total Hip,TH)以及全身的骨密度,且测试方法为双能 X 射线吸收测定法(Dual-energy X-ray absorptiometry,DXA).

1.3　排除标准

①非随机对照研究;②临床个案研究;③运动干预强度未详细说明或者用指标表述;④数据报告不完整,数据无法使用;⑤重复研究内容,取最新研究;⑥综述、会议报告类;⑦结局指标缺少或不明确.

1.4　文献检索

系统检索 PubMed、Web of Science、Cochrane Library、Embase、CNKI、万方数据库、中国生物医学数据库(CBM),筛选并收集相关中英文期刊论文,文献检索以自由词加组合词方式进行检索,检索时限从各大数据库建库至 2025 年 12 月 20 日.

中文检索式:(骨密度 OR 骨密度减少 OR 骨量减少 OR 骨质流失 OR 骨质疏松)

AND(有氧运动 OR 有氧训练 OR 有氧锻炼 OR 耐力运动 OR 步行 OR 快走 OR 慢跑 OR 跑步 OR 骑自行车 OR 骑车 OR 有氧健身 OR 有氧操 OR 舞蹈 OR 太极 OR 太极拳 OR 运动疗法 OR 运动处方)AND

(中老年 OR 中年 OR 老年 OR 老年人 OR 绝经后 OR 老龄) AND(随机对照实验)

英文检索式:(Bone density OR decreased bone density OR decreased bone mass OR bone loss OR osteoporosis) AND(Aerobic exercise OR aerobic training OR aerobic exercise OR endurance exercise OR walking OR brisk walking OR jogging OR running OR cycling OR cycling OR aerobic fitness OR aerobics OR dancing OR Tai Chi OR Tai Chi Chuan OR exercise therapy OR exercise prescription) AND(middle-aged and elderly OR middle-aged OR elderly OR senior OR postmenopausal OR elderly) AND(randomized controlled trial OR RCT)

1.5　文献筛选和资料提取

文献质量评价采用 Cochrane 偏倚风险评估工具,从随机序列生成、分配隐藏、盲法实施、数据完整性等方面进行评估,确保纳入文献的质量. 通过 EndNote X9 文献管理软件,对检索所得文献进行自动去重,继而由 2 名研究者独立阅读文献标题与摘要,依据纳入/排除标准进行初步判定. 对初筛通过的文献,获取全文后由 2 名研究者独立阅读,重点核查纳入标准的细节符合性,后由 2 名研究者独立提取并交叉核对,对缺失数据联系原作者获取. 数据提取内容包括:①研究基本信息:作者,发表时间,样本量;②干预措施:具体的干预手段以及周期;③结局指标.

1.6　纳入研究的方法学质量评估

本次研究统一采用物理治疗循证数据库(PEDro)量表对纳入文献进行方法学质量评价. 该量表共含 11 个条目,每个条目按 1(符合)、0(不符合)判定,第 1 条(纳入标准明确)仅用于描述不参与计分,最终得分范围 0~10 分,其中 9~10 分为高质量研究,6~8 分为质量较高研究,4~5 分为中等质量研究,<4 分为低质量研究,适配本研究中有氧运动对骨密度影响的干预性研究质量评价需求.

1.7　统计学分析

本研究采用 RevMan 5.4 和 Stata17.0 软件进行 Meta 分析. 采用均值差异(MD)作为效应量指标,各效应量均计算 95%置信区间(CI),以量化效应大小. 异质性检验采 I^2 指数定量评估研究间异质性. 当 $P>0.05$ 且 $I^2<50\%$时,认为研究间异质性较低,采用固定效应模型;当 $P<0.05$ 且 $I^2\geqslant 50\%$时,采用随机效应模型;若异质性来源无法明确,可进行敏感性分析或亚组分析. 将统计显著性水平设定为 $P<0.05$ 以判断差异有显著性意义的标准,发表偏倚评估通过漏斗图和 Egger's 检验进行. 若漏斗图存在不对称性($P<0.1$),采用 Trim and Fill 法进行校正,以调整潜在发表偏倚的影响.

2　研究结果

2.1　文献的检索流程与特征

研究者共检索到 2 968 篇文献,经排除综述、不相关研究、动物实验、数据不完整及缺少主要结局指标的文献,最终纳入 10 篇 RCT 实验研究成果,受试者共 917 例. 文献筛选流程见图 1,纳入文献基本情况见表 2.

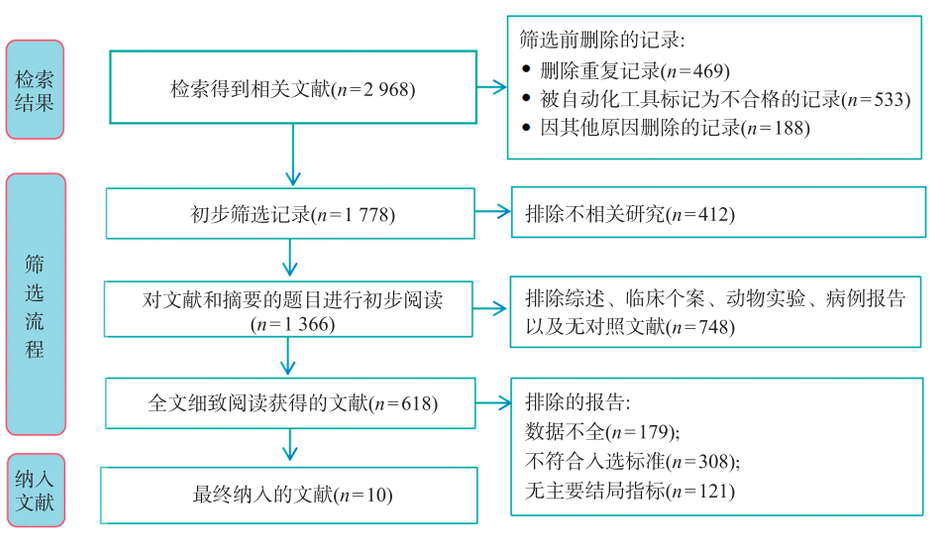


图 1　文献筛选流程图

Fig. 1　Flowchart of literature screening

表 2　纳入文献基本特征

Table 2　Basic characteristics of the included literature

作者	发表年份	样本量 C　T	性别	年龄	干预措施 C	干预措施 T	干预周期	文献质量评分	结局指标
Wen 等[12]	2016	C:22 T:24	均为女性	C:58.8±3.2 T:57.5±3.5	维持正常饮食和生活方式,不参与其他常规体育活动	团体踏板有氧运动,每周 3 次、每次 90 min(10-15 min 热身+30-35 min 目标心率维持练习+10-15 min 平衡放松+10-15 min 拉伸),运动强度为心率储备的 75%-85%,踏板高度从 10 cm 逐步提升至 20-25 cm,配合 120-126 次/分节奏的音乐	3 个月	5	LS、全身骨密度、TH
Chubak 等[13]	2006	C:84 T:83	均为女性	C:60.6±6.8 T:60.7±6.7	1 次 45 min 拉伸运动/周	5 次中等强度有氧运动(以跑步机步行和固定自行车为主)/周,每次不少于 45 min,运动强度为 60%~75%最大心率	12 个月	7	全身骨密度
郭宏焘[14]	2015	C:40 T:40	男 14/女 26 男 15/女 25	C:68.4±3.7 T:68.0±3.9	口服维生素 D+碳酸钙,无体育锻炼	口服维生素 D+碳酸钙,肌肉注射降钙素制剂+户外负重有氧运动:含慢跑/健身操/太极拳/舞蹈(站姿),中等强度(心率≤170 次/min,每周 2-3 次、30-60 min/次;	12 个月	5	LS、FN
Kaiming 等[15]	2004	C:49 T:54	均为女性	C:53.6±3.2 T:54.4±3.3	保持久坐生活方式,不参与任何体育锻炼	杨氏太极拳运动,每天 50 min(初始计划 45 min/d),每周 5 天,持续 12 个月,平均出勤 4.2±0.9 天/周	12 个月	7	LS、FN、Troch
Serra 等[16]	2021	c:26 T:28	均为女性	C:62.71±7.63 T:58.00±6.73	仅进行 6 个月减重干预,后续 6 个月随访	6 个月减重干预+每周 3 次监督式有氧运动(跑步机快走/慢跑,运动强度>85%心率储备,每次 45 min+热身/放松 5~10 min),后续 6 个月随访	12 个月	6	LS、FN、Troch、全身骨密度
虞定海 等[17]	2014	C:31 T:34	均为女性	C:58.476±3.45 T:57.29±3.24	保持既往生活习惯,不参加专门体育锻炼、相关健康讲座,不使用影响骨代谢的药物	练习新编太极健骨操,心率控制在最大心率的 60%-70%,每周 4 次、每次 1h	12 个月	6	LS、FN、Troch
Reina 等[18]	2020	C:36 T:35	男 11/女 25 男 12/女 23	C:70±5 T:70±5	每月参加健康饮食教育课程	减重饮食干预:500-750kcal/d 热量赤字饮食,每周与营养师沟通调整;运动干预:每周 3 次有氧运动(每次 60 min,含 10 min 柔韧性+40 min 有氧如 treadmill 步行/固定单车+10 min 平衡运动,强度从 65%峰值心率渐升至 70%-85%); 补充剂:1500 mg/d 钙+1000IU/d 维生素 D	6 个月	7	FN、TH、全身骨密度、Troch
Kong 等[19]	2023	C:13 T:13	男 6/女 7 男 7/女 6	C:57.5±3.4 T:58.3±3.2	保持原有生活习惯,不参与任何规律性运动干预	标准 24 式简化太极拳,每周 4 次,每次 60 min,心率控制在最大心率的 60%-70%(约 120-140 次/分钟).	4 个月	5	LS、FN、Troch
杨永胜 等[20]	2013	C:94 T:102	男 41/女 53 男 44/女 58	C:57.13±5.18 T:56.38±6.23	不参与任何规律性运动干预	有氧运动(快走或慢跑 30 min~1h+舒展体操 10 min,每周 4~5 次+每天补充钙尔奇 D 1 片(含元素钙 600 mg、维生素 D 125IU)	12 个月	4	LS、FN
Gregori 等[21]	2025	C:55 T:54	男 30/女 25 男 28/女 26	C:71.5±4.6 T:71.3±4.7	每月参加健康饮食教育课程,不参与减重或运动计划; 补充钙 1 500 mg/d+维生素 D 1 000 IU/d	减重饮食干预:每日热量缺口 500~750 kcal,优质蛋白 1g·kg^{-1}体重,每周营养师指导+行为治疗; 运动干预:每周 3 次,30 min 有氧运动,约为其峰值心率的 65%,根据个体耐受性差异,4-6 周内可逐渐升至 70%-85%. 补充钙 1 500 mg/d+维生素 D 1 000 IU/d	12 个月	8	LS、FN、TH

注:C 为对照组、T 为实验组、LS BMD=腰椎骨密度、TH BMD=全髋骨密度、FN BMD=股骨颈骨密度、Troch BMD=大转子骨密度.

2.2　纳入文献方法学质量评估结果

此次纳入 10 篇随机对照实验研究文献,所有文献都对研究对象的基线特征进行了详细描述,并阐述了详细的干预特征与评价指标以及分组方法. 然而,所有研究均未对盲法应用以及失访或退出者的数量及其原因进行详尽说明,风险偏倚结果见图 2.

2.3　Meta 分析结果

2.3.1　腰椎骨密度

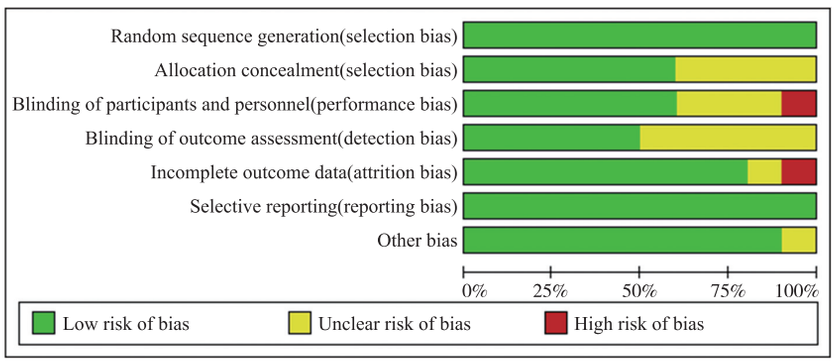
此次纳入的 10 篇随机对照试验中,有 9 篇文献对腰椎骨密度进行报道[12,14-21],各研究之间异质性较高(I^2=78%). 通过敏感性分析,采用逐一剔除法发现异质性来源于 Reina 等[18]的研究,剔除此项研究后异质性下降(I^2=30%),故采用固定效应模型进行分析. 数据显示,有氧运动能够有效改善中老年人腰椎骨密度(MD=0.02,95%CI:0.01~0.03,P=0.000 5),见图 3.

2.3.2　股骨颈骨密度

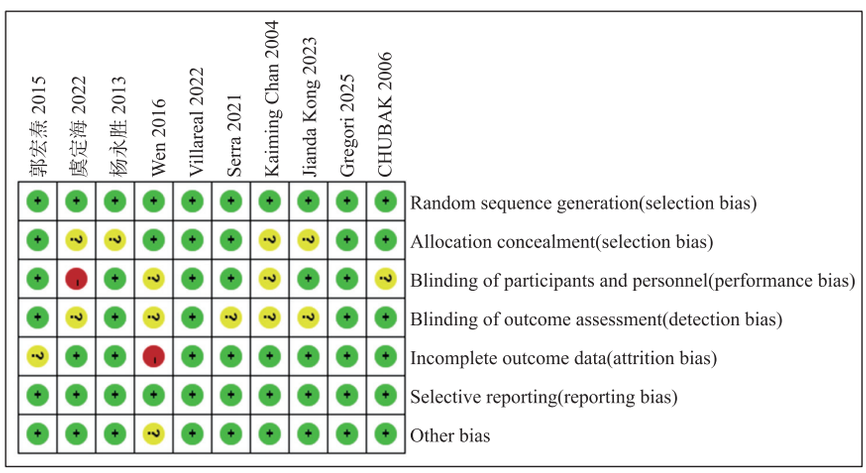
此次研究纳入的 10 篇研究中,有 8 篇研究以股骨颈骨密度作为结局指标[14-21],各研究之间异质性较高(I^2=79%),故采用随机效应模型进行分析. 通过敏感性分析,采用逐一剔除法,发现异质性结果未改变,提示研究结果较为稳健. 数据显示,有氧运动干预后股骨颈骨密度有显著性差异(MD=0.02,95%CI:0.00~0.04,P=0.040 0),表明有氧运动对股骨颈骨密度的维持和提升具有较好的效果,见图 4.

2.3.3　大转子骨密度

此次纳入的 10 篇文献中,有 5 篇以大转子骨密度为结局指标[15-19],各研究间无异质性(I^2=0%),故采用固定效应模型进行分析. 有氧运动干预后的大转子骨密度比较结果显示,差异无显著性意义(MD=0.01,95%:-0.01~0.03,P=0.350 0),见图 5.



(a) 纳入文献偏倚图



(b) 纳入文献偏倚总结图

图 2　纳入文献偏倚图

Fig. 2　Shows the bias map of the included literature

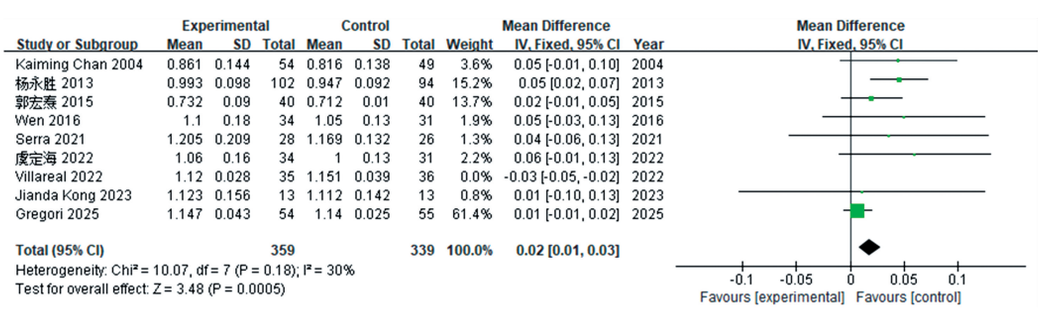


图 3　两组中老年受试者腰椎骨密度比较的森林分析图

Fig. 3　Forest analysis chart of lumbar spine bone mineral density comparison between the two groups of middle-aged and elderly subjects

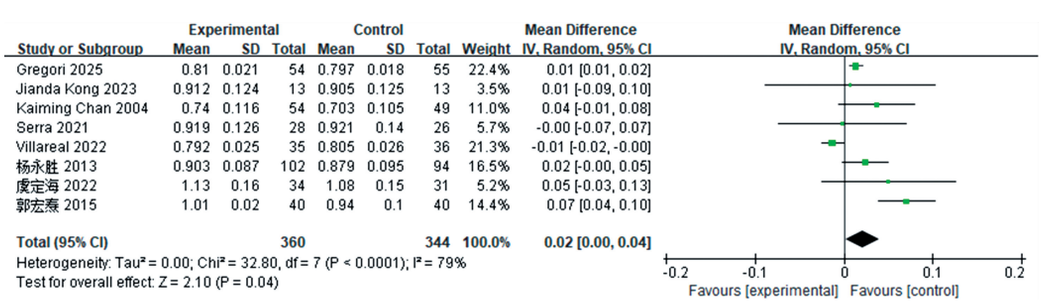


图 4　两组中老年受试者股骨颈骨密度比较的森林分析图

Fig. 4　Forest analysis chart of femoral neck bone mineral density comparison between the two groups of middle-aged and elderly subjects

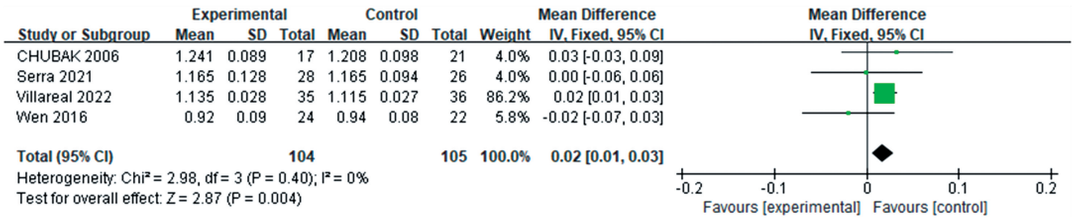


图 5　两组中老年受试者大转子骨密度比较的森林分析图

Fig. 5　Forest analysis of bone mineral density of the greater trochanter in two groups of middle-aged and elderly subjects

2.3.4　全身骨密度

此次纳入的 10 篇研究中,有 4 篇研究以全身骨密度为结局指标[12-13,16-17],各研究间无异质性(I^2=0%),故采用固定效应模型进行分析. 数据显示,有氧运动干预后全身骨密度比较有显著性差异(MD=0.02,95%CI:0.01~0.03,P=0.004 0),表明有氧运动能够有效提高全身骨密度,见图 6.

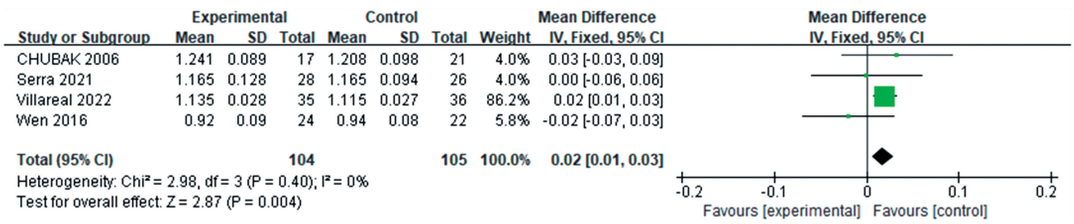


图 6　两组中老年受试者全身骨密度比较的森林分析图

Fig. 6　Forest analysis chart of whole body bone mineral density comparison between two groups of middle-aged and elderly subjects

2.3.5　全髋骨密度

此次纳入的 10 篇文献中,有 3 篇文献以全髋骨密度为结局指标进行报道[12,18,21],各研究间异质性较大(I^2=94%). 通过敏感性分析,采用逐一剔除法发现异质性来源于 Reina 等[18]的研究,剔除后此项研究的异质性下降(I^2=0%),故采用固定效应模型进行分析. 数据显示,有氧运动干预后髋部骨密度差异无显著性意义(MD=0.00,95%CI:-0.01~0.01,P=0.910 0),见图 7.

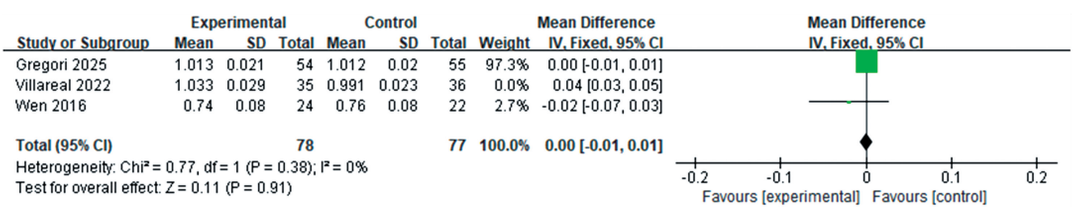


图 7　两组中老年受试者髋部骨密度比较的森林分析图

Fig. 7　Forest analysis chart of hip bone mineral density comparison between the two groups of middle-aged and elderly subjects

2.4　亚组分析

2.4.1　腰椎骨密度

将主要结局指标腰椎骨密度根据运动类型进行亚组分析,结果显示,太极运动、干预周期不少于 6 个月及不联合饮食减重干预的有氧运动方案对中老年人骨密度显示出更大的合并效应值,改善效果均具有统计学意义(P<0.05). 同时,研究发现是否联合饮食减重干预可能是影响运动干预效果的重要因素(亚组间 P=0.03),而运动类型和干预周期亚组间比较差异无显著性意义(P=0.21,P=0.35),见表 3.

2.4.2　股骨颈骨密度

将主要结局指标腰椎骨密度根据运动类型进行亚组分析,结果显示,步行、慢跑运动、干预时长不少于 6 个月及不进行饮食减重干预的有氧运动方案对中老年人股骨颈骨密度显示出更大的合并效应值,改善效果均具有统计学意义(P<0.05). 同时,结果显示干预时长、不饮食减重干预是影响有氧运动干预股骨颈骨密度的重要因素,而运动类型的组间比较无显著性差异(P>0.05),见表 4.

亚组分析结果显示饮食减重干预对中老年骨密度产生负面影响. 中老年人因年龄相关的骨量流失、性激素水平下降及维生素 D 合成能力减弱,对减重饮食干预中的营养缺乏更为敏感. 不当的减重方案,如

极低热量饮食、低蛋白饮食及低钙或低维生素 D 摄入,可通过多重机制损害骨密度:膳食钙不足会继发甲状旁腺激素升高,从而抑制骨吸收;蛋白质缺乏则抑制骨胶原合成及胰岛素生长因子的分泌;能量应激状态可导致皮质醇水平升高与性激素水平进一步下降,直接抑制成骨细胞活性;快速减重常伴随肌肉减少症,进而减少骨骼的机械负荷及肌肉—骨旁分泌信号. 此外,极低碳水化合物或生酮饮食可能诱发代谢性酸中毒并增加尿钙排泄,对中老年人尤为不利.

表 3　腰椎骨密度亚组分析结果

Table 3　Subgroup analysis results of lumbar spine bone density

亚组因素	亚组	纳入研究数	试验组/对照组(例)	各亚组效应值(95%*CI*,*P* 值)	亚组内异质性	亚组内效应值	亚组间差异
运动类型	太极类型	3	101/93	0.05(0.01,0.09)	$I^2=0\%$,$P=0.77$	$p=0.03$	$Chi^2=1.59$,$df=1$,
	步行、慢跑类型	6	293/282	0.01(−0.01,0.04)	$I^2=84\%$,$P<0.000\ 001$	$p=0.31$	$p=0.21$;$I^2=37.3\%$
干预周期	<6 个月	3	82/80	−0.00(−0.06,0.06)	$I^2=57\%$,$P=0.10$	$p=0.97$	$Chi^2=0.86$,$df=1$,
	≥6 个月	6	312/295	0.03(0.01,0.05)	$I^2=47\%$,$P=0.09$	$p=0.006$	$p=0.35$;$I^2=0\%$
饮食减重干预	有饮食减重干预	3	117/117	−0.01(−0.04,0.03)	$I^2=86\%$,$P=0.000\ 9$	$p=0.71$	$Chi^2=4.87$,$df=1$,
	无饮食减重干预	6	277/258	0.04(0.02,0.05)	$I^2=0\%$,$P=0.75$	$p<0.000\ 1$	$p=0.03$;$I^2=79.5\%$

表 4　股骨颈骨密度亚组分析结果

Table 4　Subgroup analysis results of femoral neck bone mineral density

亚组因素	亚组	纳入研究数	试验组/对照组(例)	各亚组效应值(95%*CI*,*P* 值)	亚组内异质性	亚组内效应值	亚组间差异
运动类型	太极类型	3	101/93	0.04(0.00,0.07)	$I^2=0\%$,$P=0.78$	$p=0.04$	$Chi^2=2.24$,$df=1$,
	步行、慢跑类型	5	293/282	0.01(0.00,0.01)	$I^2=87\%$,$P<0.000\ 01$	$p=0.000\ 3$	$p=0.13$;$I^2=55.4\%$
干预周期	<6 个月	2	48/49	−0.01(−0.02,−0.00)	$I^2=0\%$,$P=0.68$	$p=0.03$	$Chi^2=12.10$,$df=1$,
	≥6 个月	6	312/295	0.03(0.01,0.05)	$I^2=64\%$,$P=0.02$	$p=0.005$	$p=0.000\ 5$;$I^2=91.7\%$
饮食减重干预	有饮食减重干预	3	117/117	0.00(−0.02,0.02)	$I^2=85\%$,$P=0.001$	$p=0.98$	$Chi^2=6.33$,$df=1$,
	无饮食减重干预	5	243/227	0.04(0.02,0.06)	$I^2=27\%$,$P=0.24$	$p=0.000\ 3$	$p=0.01$;$I^2=84.2\%$

2.5　Meta 回归结果

为探究研究间异质性的潜在来源,以效应量为因变量,将干预周期、运动强度、单次持续时间及频率作为协变量,进行多因素 Meta 回归分析. 结果显示,本研究的 Meta 回归未识别出明确的异质性来源,尽管干预周期的值接近临界(P=0.077),但仍未达到统计学显著水平,见表 5. 这可能与纳入研究文献数量相对较少进而导致的检验效能不足有关. 此外,各运动方案特征之间可能存在交互作用,Meta 回归结果难以完全解析. 未来需纳入更多高质量原始研究,或采用更细致的协变量分类以进一步探索.

表 5　Meta 回归分析结果

Table 5　Meta regression analysis results

协变量	*β* 值	标准误	*t* 值	*P* 值	95%*CI*
干预周期	−0.681	0.257	−2.65	0.077	−1.450,0.137
干预时长	0.054	0.192	0.28	0.796	−0.558,0.667
干预强度	−0.204	0.242	−0.84	0.461	−0.976,0.567
干预频率	0.833	0.371	1.32	0.280	−0.693,1.669

2.6　发表偏倚分析

由于纳入文献数量有限,因此仅对结局指标腰椎骨密度、股骨颈骨密度为基准绘制漏斗图并结合 Egger's 检验进行发表偏倚评估. 漏斗图显示,各研究点大致对称地分布在合并效应量的两侧,对腰椎骨密度、股骨颈骨密度分别进行 Egger's 检验,*P* 值依次为 0.277 和 0.664,未检测到显著的发表偏倚(图 8).

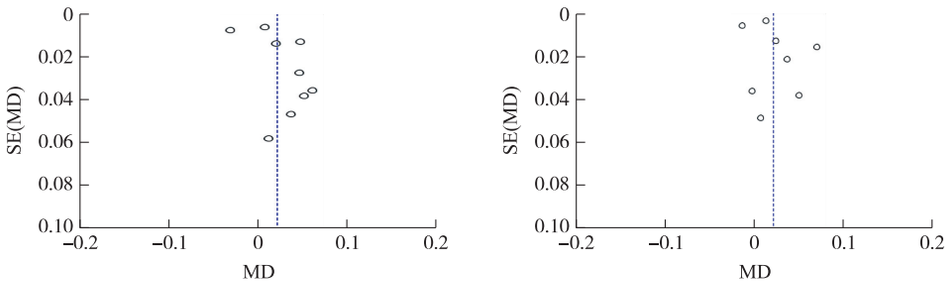
2.7　安全性分析

本研究纳入的文献中,部分文献报道了受试者退出的原因,主要包括干预依从性问题、健康相关因素及个人与客观原因,纳入的研究成果随访完成率高,退出人群基线特征与完成者无显著差异,未显著影响研究结果的客观性.

2.8　证据质量评价

采用 GRADE 进行证据质量评价(表 6). 结果显示:FN、Troch、全身骨密度证据等级为中级,LS、TH 证

据等级为低级. 这主要是因为样本量较小,且前期研究者在干预过程中未进行分配隐藏和实施盲法.



(a) 结局指标腰椎骨密度漏斗图　　(b) 结局指标股骨颈骨密度漏斗图

图 8　发表偏倚分析漏斗图

Fig. 8　Funnel plot for publication bias analysis

表 6　GRADE 证据质量评价

Table 6　GRADE evidence quality evaluation

结局指标	纳入研究数量/n	发表偏移	不一致性	间接性	不准确性	局限性	证据等级
LS 骨密度	9[12,14-21]	1[a]	1[b]	0	0	0	低级
FN 骨密度	8[14-21]	1[a]	0	0	0	0	中级
Troch 骨密度	5[15-19]	1[a]	0	0	0	0	中级
全身骨密度	4[12-13,16-17]	1[a]	0	0	0	0	中级
TH 骨密度	3[12,18,21]	1[a]	1[b]	0	0	0	低级

注:a:研究未对随机分组、分配隐藏和实施盲法等方面详尽描述;b:不同研究间 *CI* 重叠程度较差且异质性检验 I^2 值较高.

3　讨论

中老年人因增龄导致骨量流失加速,是骨密度研究的重点人群[22];但该群体常因生活方式、工作压力及健康意识不足而忽视骨质疏松防治,增加骨密度下降及并发症风险. 研究表明,骨密度每降低 1 个标准差,骨折风险升高 1.5~2.6 倍,在 65 岁以上人群中尤为显著[23]. 因此,探索有氧运动等非药物干预手段对改善骨密度具有重要临床意义. 抗阻练习虽被认为是维持骨密度的首选运动方式[24-25],但高强度下存在受伤风险与执行门槛,效果受中老年人身体和运动能力限制. 有氧运动因安全性高、可及性强,且能在改善骨骼健康的同时对心血管、代谢及认知功能产生积极影响,对体能较弱、有关节问题或心血管疾病风险的中老年人更易开展和坚持,应用日益广泛[26]. 与其他运动干预相比,有氧运动强度易于掌控,不受场地和器材等条件限制,执行性和依从性较高[27-28]. 既往研究表明,有氧运动可增强肌肉力量与平衡能力,降低跌倒及骨折风险[29-32]. 其机制复杂:骨骼作为动态活组织,能感知并适应机械负荷,超阈值负荷激活骨形成,促进成骨细胞活动,增加骨量与骨密度;负荷减少则引发骨吸收,导致骨量流失[33-34]. 运动产生的宏观力学信号经细胞力学转导转化为分子信号,调控成骨细胞与破骨细胞活性,形成维持骨正常代谢的动态耦联平衡,使骨重塑向骨形成倾斜[35]. 因此,有氧运动是一种安全性较高的非药物干预方式;但对于高龄、骨量流失严重或平衡能力障碍者,运动前仍需进行适应性评估. 不同有氧运动的方式、强度、频率和持续时间会影响运动安全性,临床应用时应根据患者具体情况选择适宜方案.

腰椎骨密度是评估骨骼健康、诊断骨质疏松症及预测骨折风险的核心指标之一. 在骨量开始明显减少的早期阶段,腰椎骨密度会率先表现出异常,腰椎骨密度能够准确预测老年人群髋部骨折的发生[36],这使得它成为骨质疏松早期筛查和干预的首选部位. 在既往关于有氧运动改善腰椎骨密度的研究中,董宏等[9]发现,超过 12 个月,每周 3 次及以上,每次运动时间控制在 30~60 min 的有氧运动对中老年人的腰椎骨密度有较好的改善作用,对预防骨质疏松效果明显. 郝建英等[37]也得出类似的结论,有氧运动能对中老年人的腰椎骨密度起到良好的改善效果,对中老年男性人群提升效果更加显著. 与本研究显示一致,与对照组相比,有氧运动能够有效改善中老年人腰椎骨密度($MD=0.02$,95%CI:0.01~0.03,$P=0.000\ 5$).

股骨颈作为连接骨盆与下肢的关键承重结构,其完整性是维持正常步态、平衡及活动能力的基础,对中老年人的生活质量与独立性具有决定性影响[38]. 其水平低下不仅直接增加髋部骨折风险,也与衰弱进程加速、抑郁症状及认知功能下降密切相关[39-40]. 并且股骨颈骨折将直接导致髋关节功能丧失、剧烈疼痛

与行动受限,严重影响患者的日常生活[41]. 本研究显示,与对照组相比,有氧运动对股骨颈骨密度的维持和提升具有较好的效果($MD=0.02$,95%CI:0.00~0.04,$P=0.04$),这一结果与程丽红等[42]的结论一致. 股骨颈骨密度是反映中老年人整体健康状况的综合性生物标志物. 由于纳入研究的异质性较大($I^2=79\%$),因此在本研究中依据运动类型、干预周期、饮食干预进行了分析,结果表明,太极运动与步行、慢跑均显示出正向效应;干预周期超过 6 个月比短期干预效果更优;而采用单纯运动方案不联合饮食干预比联合饮食干预会带来更明确的效益. 其原因可能是当体重减轻时,施加在股骨颈上的重力负荷直接减少,会导致骨形成速率下降和骨吸收速率增加,即使是轻微的负重减少也会导致骨质流失和骨结构变化[43].

在有氧运动对中老年人髋部骨密度和大转子骨密度的影响效果研究中,Welsh 等[44]认为高冲击有氧运动能够显著提升髋部骨密度. Beavers 等[45]发现,有氧运动和阻力运动都能够提高髋部骨密度. 曹克勇等[46]的研究结论则显示,中等强度与高强度有氧运动能够提高髋部骨密度,但低强度有氧运动对髋部骨密度的提升无明显差异;此次 Meta 分析结果显示,有氧运动干预后髋部骨密度差异无显著性意义($MD=0.00$,95%CI:−0.01~0.01,$P=0.91$). Pinheiro 等[47]的结论指出有氧运动对大转子骨密度有积极影响;此次 Meta 分析结果中,有氧运动对中老年人大转子骨密度改善效果未达到统计学意义($MD=0.01$,95%CI:−0.01~0.03,$P=0.35$). 以上研究结果与既往研究存在差异,导致这种差异的原因主要有以下几个方面:首先,不同的随机对照试验所选取的中老年受试者在年龄、性别、身体健康状况和骨量流失程度等方面存在差异,这些因素均可能影响有氧运动对骨密度的干预效果[48-49]. 其次,不同研究中所采用的有氧运动干预方案,如频率、持续时间、运动模式及运动强度的差异与剂量-反应关系等,也可能存在差异,即不同干预方案的变化也会对干预效果产生较大的影响[50-51].

全身骨密度是评估整体骨骼储备、预测骨折风险及反映机体衰老和功能衰退的综合性指标[52-53]。由于有氧运动可能对不同部位骨密度产生差异影响,本研究进一步评价全身骨密度以观察整体效果。结果显示,有氧运动可显著提高全身骨密度($MD=0.02$,95%CI:0.01~0.03,$P=0.004$)。但纳入相关随机对照试验仅 4 篇,样本量有限,结果可靠性仍需验证。未来需纳入更大样本的随机对照试验,并对骨质疏松、骨折高危人群及中老年男性等开展分层分析,以进一步明确有氧运动对全身骨密度的长期影响。

此外,本研究中发表偏倚分析结果表明,多数漏斗图呈现大致对称的分布,仅有个别图像显示不对称,这反映出所纳入的研究可能存在一定的发表偏倚,这或许与纳入分析的研究成果数量较少有关. 未来研究可进一步优化有氧运动方案,增加样本量,并延长运动干预周期与追踪观察时间,进一步探讨有氧运动对中老年人骨密度的具体影响,为有氧运动提升骨骼健康、预防骨质疏松方面的作用,提供更精准的证据支持.

4　结论

本 Meta 分析显示,有氧运动对中老年人骨密度的影响具有部位特异性,能有效提升腰椎、股骨颈及全身骨密度,但对大转子和髋部骨密度的改善效果不显著. 进一步亚组分析显示,步行或慢跑、干预周期不少于 6 个月且不联合饮食减重的方案,对腰椎和股骨颈骨密度的改善效果更优;其中,是否联合饮食减重是影响干预效果的关键因素,联合饮食减重干预可能削弱有氧运动对中老年人骨密度的骨骼获益.

[参考文献]

[1] 邢双涛,冯世杰,关朝阳. 不同运动对老年人骨密度影响的网状 Meta 分析[J]. 中国骨质疏松杂志,2024,30(3):348-354.

[2] 张军,陆大江. 有氧运动结合抗阻力量训练对中年女性身体成分和骨密度的影响[J]. 中国老年学杂志,2016,36(18):4553-4556.

[3] 吴志建,王竹影,胡冰倩,等. 运动锻炼改善绝经后妇女骨密度效果的 meta 分析[J]. 中国康复医学杂志,2020,35(8):963-971.

[4] 常燕,钟霞,邓晓岚,等. 有氧健身锻炼对改善老年人体成分的作用[J]. 中国体育科技,2003,39(5):50-51.

[5] 徐中华. 有氧训练和力量训练对男性中老年体成分和骨密度的影响[J]. 体育科技文献通报,2013,21(7):103-105.

[6] 侯希贺,张玲莉,李慧,等. 运动训练与骨代谢和脂代谢:运动强度和持续时间是影响的重要因素[J]. 中国组织工程研究,2018,22(12):1950-1955.

[7] Lin W Y,Wang S F,Lin Y K. Effects of different exercise habits on mitigating physical frailty in older adults:a cross-sectional study[J]. Journal of Sports Sciences,2025,43(14):1355-1363.
[8] 阮彩莲,陈富强,刘志勇,等. 长期有氧运动对女性骨质疏松患者雌激素和骨质成分的影响[J]. 中国骨质疏松杂志,2016,22(2):159-162.
[9] 董宏,孟良,王荣辉. 体育锻炼对中老年人群骨密度影响的 meta 分析[J]. 北京体育大学学报,2016,39(3):58-65,87.
[10] 赵静,程亮. 不同方式长期运动对老年女性骨密度的影响[J]. 中国骨质疏松杂志,2020,26(1):50-53.
[11] Bolam K A,Uffelen J G Z,Taaffe D R. The effect of physical exercise on bone density in middle-aged and older men:a systematic review[J]. Osteoporosis International,2013,24(11):2749-2762.
[12] Wen H,Huang T,Li T,et al. Effects of short-term step aerobics exercise on bone metabolism and functional fitness in postmenopausal women with low bone mass[J]. Osteoporosis International,2017,28(2),539-547.
[13] Chubak J,Ulrich C M,Tworoger S S,et al. Effect of exercise on bone mineral density and lean mass in postmenopausal women[J]. Medicine and Science in Sports and Exercise,2006,38(7):1236-1244.
[14] 郭宏焘. 户外负重有氧运动结合局部肌力训练在老年骨质疏松预防中的效果研究[J]. 中国骨质疏松杂志,2015,21(8):941-944.
[15] Kaiming C,Ling Q,Mingchu L,et al. A randomized,prospective study of the effects of Tai Chi Chun exercise on bone mineral density in postmenopausal women[J]. Archives of Physical Medicine and Rehabilitation,2004,85(5):717-722.
[16] Serra M C,Ryan A S. Bone mineral density changes during weight regain following weight loss with and without exercise[J]. Nutrients,2021,13(8):2848.
[17] 虞定海,王会儒,谢业雷,等. 太极健骨操练习对绝经期女性骨密度的影响[J]. 上海体育学院学报,2014,38(6):100-104.
[18] Reina A,Lina A,Waters D L,et al. Effect of aerobic or resistance exercise,or both,on bone mineral density and bone metabolism in obese older adults while dieting:a randomized controlled trial[J]. Journal of Bone and Mineral Research,2020,35(3):430-439.
[19] Kong J,Chunlan T,Lei Z. Effect of different types of Tai Chi exercise programs on the rate of change in bone mineral density in middle-aged adults at risk of osteoporosis:a randomized controlled trial[J]. Journal of Orthopaedic Surgery and Research,2023,18(1):949.
[20] 杨永胜,孙兰英. 强化生活方式联合药物干预对中老年骨量减少的疗效分析[J]. 中外医疗,2013,32(23):18-19.
[21] Gregori G,Mediwala S,Liebschner M,et al. Bone quality response to lifestyle intervention in older adults with obesity(LIMB-Q trial):a randomised controlled trial[J]. Lancet Healthy Longevity,2026,6(9):100761.
[22] 王珍玉,夏渊,卢悦,等. 不同抗阻训练方案对绝经后女性骨密度影响的网状 Meta 分析[J]. 中国组织工程研究,2023,27(28):4586-4592.
[23] Bruno A G,Broe K E,Zhang X C,et al. Vertebral size,bone density,and strength in men and women matched for age and areal spine BMD[J]. Journal of Bone and Mineral Research,2014,29(3):562-569.
[24] O'bryan S J,Giullano C,Woessner M N,et al. Progressive resistance training for concomitant increases in muscle strength and bone mineral density in older adults:a systematic review and meta-analysis[J]. Sports Medicine,2022,52(8):1939-1960.
[25] 朱珏,董瑛. 渐进性抗阻训练对老年骨质疏松性髋部周围骨折患者骨密度及疼痛评分的影响[J]. 中国老年学杂志,2023,43(4):855-858.
[26] Zoila F,Filannino M F,Panaro A M,et al. Enhancing active aging through exercise:a comparative study of high-intensity interval training and continuous aerobic training benefits[J]. Frontiers in Aging,2025,6:1493827.
[27] 郝莹,杨宁宁,孙梦莹,等. 不同运动对绝经后骨质疏松女性骨密度的影响:基于网状 Meta 分析的结果[J]. 生物化学与生物物理进展,2025,52(6):1544-1559.
[28] 卫金鹏,徐红旗,孙嘉禾,等. 运动对骨质疏松老年人骨密度影响的 Meta 分析[J]. 吉林体育学院学报,2024,40(1):92-100.
[29] Wang Q,Jiang X,Shen Y,et al. Effectiveness of exercise intervention on fall-related fractures in older adults:a systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials[J]. BMC Geriatrics,2020,20(1):322.
[30] Vidoni D E,Grove G,Reed S N A,et al. Adverse events during a 12-month multisite dose-response aerobic exercise intervention[J]. Exercise,Sport & Movement,2025,3(2):e00045.
[31] Beck R B,Daly M R,Singh F A M,et al. Exercise and sports science australia(ESSA) position statement on exercise prescription for the prevention and management of osteoporosis[J]. Journal of Science and Medicine in Sport,2016,20(5):

438-445.
[32] Behzad J,Pitsillides A A. Correction to:aging and mechanoadaptive responsiveness of bone[J]. Current Osteoporosis Reports,2020,20(4):227.
[33] 徐锋鹏,胡敏,黄俊豪,等. 不同类型运动对骨密度影响的研究进展[J]. 上海体育学院学报,2017,41(1):55-60.
[34] 李苗苗,罗炯,张庭然,等. 骨质代谢与运动训练:骨重塑与骨细胞增殖[J]. 中国组织工程研究,2019,23(34):5544-5549.
[35] Matt P,Alberto S,Gang P,et al. L-BAIBA synergizes with sub-optimal mechanical loading to promote new bone formation[J]. JBMR Plus,2023,7(6):e10746.
[36] 牛维,邵敏. 腰椎骨密度与老年骨质疏松性髋部骨折的关系[J]. 中医正骨,2001,13(6):19-20.
[37] 郝建英,谢保城. 太极运动对中老年人群骨密度影响的 Meta 分析[J]. 中国组织工程研究,2019,23(19):3109-3116.
[38] Daria A J,Natalie L,Penelope T,et al. The EXPRESS study:exercise and protein effectiveness supplementation study supporting autonomy in community dwelling frail older people-study protocol for a randomized controlled pilot and feasibility study[J]. Pilot and Feasibility Studies,2018,4(1):8.
[39] Patrick T,Mohit B. Cochrane in CORR®:exercise for improving outcomes after osteoporotic vertebral fracture[J]. Clinical Orthopaedics and Related Research,2020,478(1):16-22.
[40] 魏晢,刘欣欣,宗国芳,等. 影响老年股骨颈骨折健康状态和生活质量的因素[J]. 中国矫形外科杂志,2023,31(14):1290-1294.
[41] 郑庆云.机械压力与骨代谢激素在运动促进骨形成中的作用[D]. 上海:华东师范大学,2011.
[42] 程丽红,章玉玲,阮诗慧,等. 有氧运动对老年骨质疏松症患者衰弱干预效果研究[J]. 中国老年保健医学,2024,22(1):164-167.
[43] 聂明剑,张智海,冯强,等. 12 周社区运动干预对绝经后骨质疏松症女性骨密度的影响研究[J]. 中国骨质疏松杂志,2019,25(4):446-451.
[44] Welsh L,Rutherford O M. Hip bone mineral density is improved by high-impact aerobic exercise in postmenopausal women and men over 50 years[J]. European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology,1996,74(6):511-517.
[45] Beavers K M,Beavers D P,Martin S B,et al. Change in bone mineral density during weight loss with resistance versus aerobic exercise training in older adults[J]. Journals of Gerontology Series A-Biological Sciences and Medical Sciences,2017,72(11):1582-1585.
[46] 曹克勇,李雪芹,祝腊香,等. 不同强度有氧运动对男性老年人骨密度和体成分的影响[J]. 中国康复,2016,31(2):91-93.
[47] Pinheiro M B,Juliana O,Adrian B,et al. Evidence on physical activity and osteoporosis prevention for people aged 65+years:a systematic review to inform the WHO guidelines on physical activity and sedentary behaviour[J]. International Journal of Behavioral Nutrition and Physical Activity,2020,17(1):150.
[48] 张军. 有氧运动结合抗阻力量练习对中年人身体成分和骨密度的影响[D]. 上海:上海体育学院,2017.
[49] May M C,David S,Markus S,et al. Adherence to mediterranean diet and its associations with circulating cytokines,musculoskeletal health and incident falls in community-dwelling older men[J]. Current Developments in Nutrition,2021,5(S2):6.
[50] 李天香,史冀鹏,孙嘉禾,等. 运动对骨量减少老年人影响效果的 Meta 分析[J]. 体育科技文献通报,2024,32(3):113-117,135.
[51] 柴牛兵. 全身振动训练对绝经女性骨密度和跌倒风险干预效果的系统评价与 Meta 分析[D]. 北京:北京体育大学,2021.
[52] Body J J,Bergmann P,Boonen S,et al. Non-pharmacological management of osteoporosis:a consensus of the Belgian Bone Club[J]. Osteoporosis International,2011,22(11):2769-2788.
[53] Marshall D,Johnell O,Wedel H. Meta-analysis of how well measures of bone mineral density predict occurrence of osteoporotic fractures[J]. BMJ,1996,312(7041):1254-1259.

[责任编辑:杜忆忱]