运动训练影响绝经后骨质疏松症的研究进展

李晓娟[1],卓秀建[2],金 煜[1],陈小波[2,3]
(1. 赣南医科大学康复与运动健康学院;2. 赣南医科大学第一附属医院康复医学科;
3. 赣南医科大学第二附属医院康复医学科,江西 赣州 341000)

摘 要:绝经后骨质疏松症(Postmenopausal osteoporosis,PMOP)是女性中常见的骨代谢性疾病,且随着年龄增长,因激素水平变化和骨密度下降,PMOP的发生风险显著增加,从而导致骨折。长期合理的运动训练能够延缓PMOP进程,减缓骨量流失,进而减少骨折的发生率。本文对PMOP的发病机制及运动训练对PMOP的疗效进行了概述,并详细探讨了多种运动训练在改善PMOP中的作用机制,为临床制定合理的运动治疗训练方案提供依据。文献复习结果表明,有氧运动、力量训练、平衡柔韧性训练及综合训练均能通过多靶点机制有效改善PMOP;基于患者具体情况制定个体化运动训练方案,是实现其防治效益最大化的关键。

关键词:绝经后骨质疏松;运动训练;骨折预防
中图分类号:R681 **文献标志码**:A **文章编号**:2097-7174(2026)10-0960-07
DOI:10.3969/j.issn.2097-7174.2026.10.011

The research progress on the impact of exercise training on postmenopausal osteoporosis

LI Xiaojuan[1], ZHUO Xiujian[2], JIN Yu[1], CHEN Xiaobo[2,3]
(1. School of Rehabilitation and Exercise Health, Gannan Medical University; 2. Department of Rehabilitation Medicine, The First Affiliated Hospital of Gannan Medical University; 3. Department of Rehabilitation Medicine, The Second Affiliated Hospital of Gannan Medical University, Ganzhou, Jiangxi 341000)

Abstract: Postmenopausal osteoporosis (PMOP) is a common bone metabolic disease in women. As age increases, the risk of PMOP significantly rises due to hormonal changes and a decrease in bone density, leading to fractures. Long-term, proper exercise training can delay the progression of PMOP, slow down bone mass loss, and subsequently reduce the incidence of fractures. This paper provides an overview of the pathogenesis of PMOP and the effectiveness of exercise training in treating PMOP, with a detailed discussion on the mechanisms by which various types of exercise training improve PMOP, providing a basis for formulating appropriate exercise treatment prescriptions in clinical practice. The findings indicate that aerobic exercise, strength training, balance and flexibility training, and combined training can all effectively improve PMOP through multi-target mechanisms. Developing individualized exercise prescriptions tailored to each patient's specific condition is key to maximizing the therapeutic benefits of these interventions.

Key words: Postmenopausal osteoporosis; Exercise training; Fracture prevention

绝经后骨质疏松症(Postmenopausal osteoporosis,PMOP)是一种常见的骨骼代谢性疾病,主要表现为骨密度降低、骨质结构受损、骨骼脆弱性增加[1],导致骨折风险显著升高。随着年龄的增长,女性的雌激素水平逐渐下降,这一生理变化显著加速了骨密度下降,使得绝经后妇女成为骨质疏松症的高危人群。研究显示,1/3的50岁以上女性会罹患PMOP,进而导致骨折发生率增高,严重影响了患者的生活质量[2]。

目前,PMOP的治疗主要依赖于药物治疗,常用

基金项目:江西省教育厅科学技术研究项目(GJJ201521);江西省中医药管理局科技计划项目(2021A256)
通信作者:陈小波,男,博士,副教授,硕士生导师,研究方向:重症患者的心肺康复、老年性骨质疏松症康复。E-mail:luckychenxiaobo@126.com

的药物包括抗骨吸收药物、促进骨生成的药物以及钙和维生素 D[3]。然而，长期使用药物可能导致不良反应，包括肠胃不适（如恶心、呕吐、胃痛）及对肝肾等器官的影响，增加治疗负担。非药物治疗方法，尤其是运动训练，成为近年来 PMOP 治疗研究的热点。运动训练作为一种安全且有效的非药物干预手段，已被广泛认同为改善 PMOP 的有效方法[4]。多项系统评价和荟萃分析证实，有氧运动、力量训练和综合训练等多种运动方式，均能显著提高绝经后女性腰椎和股骨颈的骨密度[5-6]，从而有效降低骨折风险。主要机制是运动能够通过增加骨组织的机械负荷，刺激骨细胞活动，促进骨代谢，从而增加骨密度。此外，运动还可以增强肌肉力量、提高关节稳定性和身体平衡能力[7]。综上所述，运动训练在 PMOP 的防治中扮演着不可或缺的角色。

尽管运动对 PMOP 的疗效已得到初步证实，其具体作用机制及最优运动方案仍待深入阐明，因此，本文综述了近年来运动训练在 PMOP 治疗中的应用，并探讨不同类型的运动对 PMOP 的作用机制及其临床效果，旨在为绝经后妇女提供更加科学的运动治疗方案，并为相关领域的研究者提供参考。

1　绝经后骨质疏松症（PMOP）的发病机制

PMOP 发病机制复杂，涉及骨代谢失衡、细胞凋亡、炎症反应、自噬变化、激素水平波动以及肠道微生物（Gut microbes，GM）的相关变化等方面。特别是女性在绝经后经历一系列生理变化后，PMOP 的发生风险显著增加。

1.1　骨代谢　骨代谢由破骨细胞、成骨细胞和骨髓基质共同调控，维持骨的稳态与功能[8]。骨代谢的平衡直接关系到骨密度的维持，其中骨吸收和骨生成之间的动态平衡是保持骨量和骨微环境稳定的关键[9]。随着 PMOP 的发生，通常伴随着骨吸收过度和骨生成不足。有研究[10]表明，破骨细胞的过度活跃是 PMOP 发生的核心机制之一。破骨细胞增生与活性增加会导致骨密度显著下降；而成骨细胞功能障碍或凋亡增加，则抑制骨基质的合成，减少骨生成，从而加剧 PMOP 进展[11]。

细胞凋亡、炎症反应和自噬的变化在骨代谢的调控中起着重要作用。他们通过多种机制相互交织，影响骨代谢平衡[12]。在 PMOP 患者中，破骨细胞的存活时间延长，成骨细胞的凋亡增加，这些细胞功能的异常改变直接导致了骨吸收的增加和骨生成的减少[13]。长期的慢性炎症反应也是骨代谢紊乱的重要因素之一。免疫细胞，尤其是巨噬细胞和 T 细胞，通过分泌炎症因子（如 TNF-α、IL-6、IL-1β 等），促进破骨细胞的激活与分化，从而加剧骨吸收并抑制骨生成[14]。特别是在 PMOP 患者中，慢性炎症不仅加速了骨吸收过程，还干扰了骨修复和骨生成，进一步加剧了 PMOP 患者的病情。

1.2　女性特有的生理变化　女性在生命周期中的一些生理变化，尤其是绝经期后的激素水平变化，是 PMOP 发生的关键因素。雌激素是维持骨健康的重要激素，能够通过调控破骨细胞和成骨细胞的功能，维持骨代谢的平衡[15]。绝经后，女性体内的雌激素水平急剧下降，导致破骨细胞活性增加，而成骨细胞功能下降，从而使骨吸收大于骨生成，骨密度逐渐下降，易导致 PMOP[16]。

除了雌激素，其他激素如甲状旁腺激素（Parathyroid hormone，PTH）和糖皮质激素也与骨代谢密切相关。研究表明，长期高水平的 PTH 会激活破骨细胞[17]，增加骨吸收，导致 PMOP。

1.3　肠道菌群失调　近年来，肠道菌群在骨骼健康中的作用日益受到关注，形成了“肠-骨轴”理论。肠道菌群失调是 PMOP 发病机制中的一个新兴环节。一方面，肠道菌群影响钙、镁等关键矿物质以及维生素 D、K 等骨骼营养素的吸收与生物利用度[18]。另一方面，菌群及其代谢产物（如短链脂肪酸）可以通过调节宿主免疫系统，影响全身炎症水平。特定的菌群失调会促进炎症细胞因子（如 TNF-α、IL-6）的产生[19]，这些因子能激活破骨细胞，从而加剧骨吸收。此外，研究发现雌激素水平下降会改变肠道菌群的多样性和组成[20]，导致有益菌减少、致病菌增多，这种变化进一步破坏了肠道屏障功能，加剧了炎症介导的骨丢失。因此，肠道菌群失调构成了连接雌激素缺乏与骨代谢失衡的重要桥梁。

2　运动训练对绝经后骨质疏松症（PMOP）的治疗机制

运动训练通过多维度作用机制改善 PMOP，其核心机制涉及骨代谢调控、激素水平与炎症微环境调节、神经-肌肉系统强化及心理健康促进。

2.1　调控骨代谢平衡　运动通过机械负荷刺激骨组织，激活骨形成相关信号通路。研究表明，运动可显著增强成骨细胞活性，促进骨基质矿化，同时抑制破骨细胞过度分化与骨吸收功能，从而改善

骨代谢失衡状态[21]。以负重运动为例，骨骼在承受压力时产生的机械应力可诱导骨细胞内钙离子浓度升高，进而激活Wnt/β-catenin等促骨形成通路。此外，运动还可通过调节RANK/RANKL/OPG信号轴，抑制破骨细胞活化，减少骨量流失[17]。这种由机械应力驱动的骨代谢调控是运动改善骨质健康的核心机制。

2.2 调节激素水平与炎症微环境 运动训练不仅通过直接机械刺激改善骨骼健康，还能通过调节全身的激素水平与炎症微环境，间接促进骨质的改善。雌激素水平下降是PMOP的核心病理因素之一。运动可通过提升外周组织芳香化酶活性，促进雄激素向雌激素转化，间接增加循环雌激素浓度[22]。一项关于运动与绝经后女性性激素关系的研究也表明，运动通过提高雌激素水平、增强四肢肌肉量并减少内脏脂肪，从而有效预防和缓解PMOP的发生[23]。同时，雌激素缺乏可介导M2巨噬细胞向破骨细胞分化，加速骨吸收进程，而规律运动通过调节内分泌环境，可有效延缓此类病理机制引发的骨量流失。此外，运动可降低炎症因子（如TNF-α、IL-6）水平，抑制炎症介导的骨吸收。研究证实，中等强度有氧运动可显著降低血清骨吸收标志物（如CTX-Ⅰ）水平，同时提高骨形成标志物（如PINP）水平，表明运动对骨代谢微环境的整体改善作用[24]。

2.3 增强神经-肌肉功能 运动训练通过强化肌肉力量与神经协调性，形成骨-肌协同保护效应。力量训练可提高肌肉质量与收缩效率，提高骨骼机械负荷适应性，直接促进骨密度提升[25]；平衡与柔韧性训练则通过改善本体感觉和关节稳定性，降低跌倒风险[26]。随机对照试验显示，12周阻力训练可使PMOP患者下肢肌力提升，动态平衡能力改善，跌倒发生率降低[27]。这种功能强化对腰椎、髋部等骨折高发部位的保护尤为关键。

2.4 改善心理健康与行为依从性 PMOP患者常伴随焦虑、抑郁等心理问题，而运动可通过促进内啡肽分泌，调节下丘脑-垂体-肾上腺轴功能，缓解负面情绪[28]。心理状态的改善可增强患者运动依从性，形成“运动-心理-骨骼健康”良性循环。一项针对PMOP患者的干预研究发现，规律运动组患者的抑郁量表评分低于未接受运动干预的对照组，且骨密度改善率与运动坚持时间呈显著正相关[29]。

3 不同运动训练方法对绝经后骨质疏松症（PMOP）患者的影响

不同类型的运动训练对PMOP患者的影响各异，常见的运动训练方法主要包括有氧运动、力量训练以及平衡与柔韧性训练。这些训练方法不仅有助于提高骨密度和骨强度，还能改善患者的生活质量，降低跌倒和骨折风险。

3.1 有氧运动 有氧运动，通常包括快走、慢跑、骑行、游泳等较高强度有氧训练以及太极、八段锦等低强度有氧训练。其主要通过提高心肺功能、促进血液循环和增强全身耐力来改善PMOP[30]。对于PMOP患者，有氧运动被认为是最基础且易于实施的运动形式之一。

一项随机对照试验研究对171例PMOP患者进行太极干预发现，太极运动能够有效改善PMOP患者的肌肉力量，并增加血清PTH水平[31]。这表明，太极不仅能改善肌肉功能，还能通过调节骨密度代谢激素水平[32]，从而对骨骼健康产生积极影响。此外，Al Dahamsheh Z等[33]研究表明，有氧运动对骨密度的提高也具有一定的积极作用，特别是在早期阶段的PMOP患者中。Tartibian B等[34]研究进一步表明，有氧运动，尤其是负重性有氧运动（如快走、跑步等），有助于改善绝经后女性腰椎和股骨颈的骨密度。研究还发现，负重运动能够显著降低受试者的循环IL-6和TNF-α水平，并降低血清骨吸收标志物Ⅰ型胶原C末端肽的浓度，进一步证明了运动对骨代谢的积极影响[34]。

然而，Ebrahim S等[35]研究发现，快走对女性骨折患者的骨密度影响较小。综合现有研究来看，有氧运动对PMOP患者骨密度影响的不一致性，主要源于以下几个方面：首先，运动强度是关键的决定因素。快走等低强度运动对骨骼的机械负荷刺激较弱，难以有效激活Wnt/β-catenin等成骨信号通路[34]；而跑步、跳跃等高冲击性负重运动则能产生显著的骨应力，从而更有效地促进骨形成。其次，研究人群的异质性较高。受试者的年龄、基础骨密度、绝经年限、营养状况及激素水平等存在差异，导致对同一运动干预所产生的反应不同[36]。此外，运动干预方案的执行与监控力度存在差异也会导致效果的不一致性。部分社区干预研究难以精确控制运动强度、频率和持续时间，且患者依从性差异较大，这些都可能削弱运动的整体效应，导致结果出现偏差。因此，尽管快走作为一种轻度有氧运动

对于某些患者可能有所裨益，但对于PMOP患者，如何安全有效地达到一定的运动强度，仍需要更多的研究来评估和确认最佳运动方案。有氧运动对骨密度的改善效果与运动强度、频率及持续时间密切相关。研究推荐中等强度[心率区间：最大心率的60%～80%，即(220-年龄)×(0.6～0.8)]，每周5次，每次30～45 min，如快走、慢跑[37]。Shen C L等[31]研究显示，PMOP女性在每周3次，每次60 min的太极训练后，其骨碱性磷酸酶水平显著提高，PTH水平也得到明显改善。Cheng L等[38]分析相同频率和不同运动时长的太极拳运动对老年女性骨密度的影响，发现每周进行5次，每次30 min或60 min的太极拳锻炼，持续48周，可以提高老年女性L2～L4节段和股骨颈的骨密度。因此，进行定期适量的中等强度有氧运动能够获得较为显著的效果。然而对于体能较差的PMOP患者，建议从低强度有氧(如散步)开始，逐步增加至中等强度，结合静态平衡训练(如单腿站立)。体质较为虚弱的患者，推荐低冲击运动(如太极、游泳)，每周3～4次，每次20～30 min。而对于有骨折史的PMOP患者，优先选择水中运动(如水中有氧)，减少地面反作用力对骨骼的压力。建议PMOP患者根据个人的健康状况逐步增加运动强度和时间，从而最大化其对骨骼的益处。

3.2　力量训练　力量训练通过对肌肉施加外部负荷，刺激肌肉增长和骨骼适应性改变。一项随机对照试验指出，在经过12周的力量训练后，PMOP女性患者的肌肉力量和骨质疏松程度明显改善[27]。力量训练不仅可以增强肌肉力量和耐力，还有助于改善骨密度和骨强度，增加Ⅰ型胶原蛋白氨基末端前肽等骨代谢产物含量[39]。因此，力量训练是治疗PMOP的有效方法之一，特别是已经患有PMOP的女性，力量训练能够通过增加骨骼的负荷，刺激骨骼的骨密度增加。

力量训练对PMOP的作用主要通过施加负荷来促进骨细胞活动，增强骨骼对负荷的适应性。已有多项临床研究显示，力量训练可以显著改善骨密度，尤其是在脊柱、髋部和膝部等负重部位[40-41]。Waltman N L等[40]研究发现长期进行阻力训练的PMOP患者髋部(P=0.03)和股骨颈(P=0.03)的骨密度下降程度较未进行阻力训练的PMOP患者更低。Stengel S V等[41]研究发现，PMOP患者在经过12个月的力量训练后，腰椎骨密度(Bone mineral density，BMD)和全髋关节BMD均显著提高(P<0.05)。Daly R M等[42]研究发现，在力量训练过程中，产生的肌肉张力和机械应力会作用于骨骼，导致骨内压力发生变化。此时，组织液通过腔隙小管系统从高压区域流向低压区域，从而刺激骨细胞。这个过程会导致骨细胞内的钙浓度、环磷酸腺苷、肌醇三磷酸、前列腺素等物质的增加。研究表明，这些物质不仅能促进骨膜细胞的矿化，还能促进骨髓间充质干细胞向成骨细胞的转化，进一步增强骨形成[43]。

力量训练还通过机械负荷直接促进骨骼的强化，同时还通过增加肌肉的力量与稳定性，间接减少骨折的风险。Zhang F等[44]研究发现，在进行力量训练后，老年PMOP患者的身体机能显著提高，跌倒风险明显降低。具体而言，通过使用哑铃进行上肢力量训练，或进行深蹲等下肢训练，可以有效增强骨骼的强度，并改善下肢的稳定性，从而有效减少跌倒的风险。根据当前研究，建议每周进行2～3次力量训练，每次30～40 min，相邻2次训练之间至少间隔1天，以保证机体充分恢复并获得良好的训练效果[37]，这对于提高骨密度和改善骨骼健康有显著效果。对于骨密度T值<-2.5的PMOP患者，应以力量训练为主(如弹力带抗阻)，辅以平衡训练，避免跳跃等高冲击动作。同时动态调整训练方案，每3个月评估骨密度、肌肉力量及平衡能力，调整运动强度与类型。

3.3　平衡与柔韧性训练　平衡与柔韧性训练可以预防和改善PMOP。平衡与柔韧性训练主要通过改善神经-肌肉协调、增强关节的灵活性和稳定性来改善PMOP。平衡训练通过一系列协调性的运动，如站立平衡、单腿站立、动态平衡训练等，能够增强身体的平衡感和稳定性，显著提高老年女性的体态稳定性，有助于PMOP患者降低跌倒的风险[45]。柔韧性训练则通过拉伸肌肉和韧带，增加关节的灵活性，有助于改善PMOP患者的运动能力，减少由于关节僵硬和肌肉萎缩带来的功能障碍，同样可以降低摔倒和骨折的风险[46]。每周进行3～5次平衡与柔韧性训练，强度为轻至中度，不引起疼痛或疲劳，每次20～40 min，可以改善PMOP[47]。

3.4　综合训练　综合训练还可以将多种训练方法包括有氧、力量、平衡和柔韧性训练结合起来，已被证明对PMOP患者具有更为显著的效果。一项随机对照试验发现，将渐进式阻力训练、负重冲击和平衡训练综合运用到PMOP患者中，可以显著提高其生活质量并减少PMOP带来的风险[48]。一项meta

分析比较了力量、有氧、平衡、柔韧性和功能性健身训练组合对PMOP患者的影响，结果显示，老年女性骨质疏松患者的肌力、柔韧性、生活质量、骨密度、平衡能力和功能健康均有所改善，并降低了其跌倒风险。每周进行3～4次的综合训练，结合30 min快走和20 min力量训练，可以在短期内取得显著成效[37]。此外，综合训练还能够通过多种训练方式的互补作用，提高患者的整体运动表现，改善PMOP的多维症状。不同运动训练类型在作用机制、适用人群及推荐方案等方面存在差异，具体比较见表1。

表1 不同训练类型的比较

运动类型	作用机制	适用人群	推荐方案	优势	局限性
有氧训练	通过机械负荷刺激骨骼，提高心肺功能，促进血液循环	早期PMOP患者、体能基础较弱者	中等强度（最大心率60%～80%），每周5次，每次30～45 min（如快走、太极）	改善全身骨密度，易于实施	高强度有氧可能增加关节负担
力量训练	机械应力刺激骨细胞，增加肌肉力量与骨强度	中重度PMOP患者、需增强骨密度者	每周2～3次，每次30～40 min（哑铃、深蹲）	显著提高脊柱、髋部骨密度，降低跌倒风险	需专业指导，避免动作错误致伤
平衡与柔韧性训练	改善神经-肌肉协调、增强关节的灵活性和稳定性	轻中度PMOP患者	每周3～5次，每次20～40 min（如单腿站立、拉伸等）	增强关节灵活性和稳定性	存在一定的安全隐患，需要长期坚持
综合训练	结合有氧、力量、平衡与柔韧性训练，多维度干预	需全面改善功能的高风险患者	每周3～4次，每次50～60 min（快走+力量+平衡训练）	多维改善骨密度、平衡及生活质量	时间投入较多，需个性化调整强度

4 小结

运动干预作为PMOP防治的重要手段，已经取得了显著的进展，并显示出广阔的应用前景。通过有氧运动、力量训练和平衡柔韧性训练等，不仅能够提高骨密度和骨强度，还能有效减少骨折的发生。

在临床实践中，个体化运动处方的制定显得尤为关键。运动处方应根据患者的心率、运动耐受程度以及体质分型来定制。不同体质类型的个体对运动的需求和反应各异，因此，选择适合的运动方式和强度是确保干预效果的基础。未来应侧重于长期随机对照试验的开展，验证不同强度和类型运动对骨代谢的分子标志物的影响。此外，近年来的研究逐渐揭示了肠道菌群与骨代谢之间可能存在的相互关系。探索肠道菌群、运动与骨代谢之间的相互作用将成为一个重要的研究领域。揭示这一轴线的作用机制，有望为骨质疏松症的治疗提供新的思路和方法。

综上所述，运动干预在PMOP防治中展现了巨大的潜力，通过个体化的运动训练方案，可以有效提升骨密度和骨强度，减少骨折风险。随着更多循证医学研究的深入，运动干预的治疗方案将变得更加精准和科学，为PMOP的防治提供更加全面的解决方案。

所有作者均声明不存在利益冲突关系。

参考文献：

[1] Johnston C B, Dagar M. Osteoporosis in older adults[J]. Med Clin N Am, 2020, 104(5): 873-884.

[2] Foessl I, Dimai H P, Obermayer-Pietsch B. Long-term and sequential treatment for osteoporosis [J]. Nat Rev Endocrinol, 2023, 19(9): 520-533.

[3] Reid I R, Billington E O. Drug therapy for osteoporosis in older adults[J]. Lancet, 2022, 399(10329): 1080-1092.

[4] Mohebbi R, Shojaa M, Kohl M, et al. Exercise training and bone mineral density in postmenopausal women: an updated systematic review and meta-analysis of intervention studies with emphasis on potential moderators [J]. Osteoporos Int, 2023, 34(7): 1145-1178.

[5] Hejazi K, Rahimi G R M, Hofmeister M. Impact of exercise modalities on bone health: a meta-analysis of aerobic, resistance, and combined training on bone mineral density in postmenopausal women [J]. Arch Osteoporos, 2025, 20(1): 105.

[6] Durlević1 M, Durlević S. Analysis of different physical activity modalities as therapeutic intervention in women with osteoporosis: a scoping systematic review [J]. J Anthr Sport Phys Educ, 2025, 9(4): 25-35.

[7] Muñoz M, Robinson K, Shibli-Rahhal A. Bone health and osteoporosis prevention and treatment [J]. Clin Obstet Gynecol, 2020, 63(4): 770-787.

[8] Barnsley J, Buckland G, Chan P E, et al. Pathophysiology and treatment of osteoporosis: challenges for clinical practice in older people [J]. Aging Clin Exp Res, 2021, 33

(4)：759-773.

[9] Chen X, Zhu X, Wei A, et al. Nrf2 epigenetic derepression induced by running exercise protects against osteoporosis[J]. Bone Res, 2021, 9(1): 15.

[10] Patsch J M, Kohler T, Berzlanovich A, et al. Trabecular bone microstructure and local gene expression in iliac crest biopsies of men with idiopathic osteoporosis[J]. J Bone Miner Res, 2011, 26(7): 1584-1592.

[11] Yang T L, Shen H, Liu A, et al. A road map for understanding molecular and genetic determinants of osteoporosis[J]. Nat Rev Endocrinol, 2020, 16(2): 91-103.

[12] Sølling A S, Harsløf T, Jørgensen N R, et al. Changes in RANKL and TRAcP 5b after discontinuation of denosumab suggest RANKL mediated formation of osteoclasts results in the increased bone resorption[J]. Osteoporos Int, 2023, 34(3): 599-605.

[13] 唐志，邵阳，李绍烁，等. 单细胞测序揭示骨质疏松症患者B细胞异质性及与成骨细胞的相互作用[J]. 中国组织工程研究，2025，29(26)：5501-5510.

[14] Saxena Y, Routh S, Mukhopadhaya A. Immunoporosis: role of innate immune cells in osteoporosis[J]. Front Immunol, 2021, 12: 687037.

[15] Corbi G, Nobile V, Conti V, et al. Equol and resveratrol improve bone turnover biomarkers in postmenopausal women: a clinical trial[J]. Int J Mol Sci, 2023, 24(15): 12063.

[16] Yoh K, Ikeda K, Horie K, et al. Roles of estrogen, estrogen receptors, and estrogen-related receptors in skeletal muscle: regulation of mitochondrial function[J]. Int J Mol Sci, 2023, 24(3): 1853.

[17] 吴振斌，叶丹丹，陈西玲，等. 骨密度及骨代谢指标与骨质疏松性骨折相关性研究[J]. 中国医药指南，2022，20(6)：29-32.

[18] Ding K, Hua F, Ding W. Gut microbiome and osteoporosis[J]. Aging Dis, 2020, 11(2): 438-447.

[19] Qin C, Xie Y, Wang Y, et al. Impact of *Lactobacillus casei* BL23 on the host transcriptome, growth and disease resistance in larval zebrafish[J]. Front Physiol, 2018, 9: 1245.

[20] Lee C S, Kim J Y, Kim B K, et al. *Lactobacillus*-fermented milk products attenuate bone loss in an experimental rat model of ovariectomy-induced post-menopausal primary osteoporosis[J]. J Appl Microbiol, 2021, 130(6): 2041-2062.

[21] Pasqualini L, Ministrini S, Lombardini R, et al. Effects of a 3-month weight-bearing and resistance exercise training on circulating osteogenic cells and bone formation markers in postmenopausal women with low bone mass[J]. Osteoporos Int, 2019, 30(4): 797-806.

[22] Kucherov A, Polotsky A J, Menke M, et al. Aromatase inhibition causes increased amplitude, but not frequency, of hypothalamic-pituitary output in normal women[J]. Fertil Steril, 2011, 95(6): 2063-2066.

[23] 叶蓁蓁，易剑锋，潘建西. 运动与绝经后女性骨强度、体成分及性激素的关系[J]. 解剖学报，2021，52(3)：473-478.

[24] Evans W, Nevill A, McLaren S J, et al. The effect of intermittent running on biomarkers of bone turnover[J]. Eur J Sport Sci, 2020, 20(4): 505-515.

[25] Zhao R, Zhao X, Guan J, et al. The effect of virtual reality technology on anti-fall ability and bone mineral density of the elderly with osteoporosis in an elderly care institution[J]. Eur J Med Res, 2023, 28(1): 204.

[26] Jeong J, Choi D H, Shin C S. Core strength training can alter neuromuscular and biomechanical risk factors for anterior cruciate ligament injury[J]. Am J Sports Med, 2021, 49(1): 183-192.

[27] FilipoviĆ T N, LazoviĆ M P, BackoviĆ A N, et al. A 12-week exercise program improves functional status in postmenopausal osteoporotic women: randomized controlled study[J]. Eur J Phys Rehabil Med, 2021, 57(1): 120-130.

[28] Zhao J L, Jiang W T, Wang X, et al. Exercise, brain plasticity, and depression[J]. CNS Neurosci Ther, 2020, 26(9): 885-895.

[29] Sen E I, Esmaeilzadeh S, Eskiyurt N. Effects of whole-body vibration and high impact exercises on the bone metabolism and functional mobility in postmenopausal women[J]. J Bone Miner Metab, 2020, 38(3): 392-404.

[30] Jin L, Diaz-Canestro C, Wang Y, et al. Exerkines and cardiometabolic benefits of exercise: from bench to clinic[J]. EMBO Mol Med, 2024, 16(3): 432-444.

[31] Shen C L, Chyu M C, Yeh J K, et al. Effect of green tea and Tai Chi on bone health in postmenopausal osteopenic women: a 6-month randomized placebo-controlled trial[J]. Osteoporos Int, 2012, 23(5): 1541-1552.

[32] 邓叶龙，孔令俊，刘朝晖，等. 太极拳锻炼防治骨质疏松症的Meta分析[J]. 中医正骨，2021，33(2)：44-50.

[33] Al Dahamsheh Z, Al Rashdan K, Al Hadid A, et al. The impact of aerobic exercise on female bone health indicators[J]. Med Arch, 2019, 73(1): 35-38.

[34] Tartibian B, Hajizadeh Maleki B, Kanaley J, et al. Long-term aerobic exercise and omega-3 supplementation modulate osteoporosis through inflammatory mechanisms in post-menopausal women: a randomized, repeated measures study[J]. Nutr Metab, 2011, 8: 71.

[35] Ebrahim S,Thompson P W,Baskaran V,et al. Randomized placebo-controlled trial of brisk walking in the prevention of postmenopausal osteoporosis[J]. Age Ageing, 1997,26(4):253-260.

[36] Kemmler W,Shojaa M,Kohl M,et al. Effects of different types of exercise on bone mineral density in postmenopausal women: a systematic review and meta-analysis [J]. Calcif Tissue Int,2020,107(5):409-439.

[37] 李静,姚琴. 运动干预老年骨质疏松的研究进展[J]. 中国老年学杂志,2024,44(21):5372-5375.

[38] Cheng L,Ba H. Effect of Tai Chi exercise with the same frequency and different exercise duration on the bone mineral density of older women[J]. J Sports Med Phys Fitness,2020,60(10):1396-1400.

[39] Banitalebi E,Ghahfarrokhi M M,Dehghan M. Effect of 12-weeks elastic band resistance training on MyomiRs and osteoporosis markers in elderly women with Osteosarcopenic obesity: a randomized controlled trial [J]. BMC Geriatr,2021,21(1):433.

[40] Waltman N L,Twiss J J,Ott C D,et al. The effect of weight training on bone mineral density and bone turnover in postmenopausal breast cancer survivors with bone loss: a 24-month randomized controlled trial[J]. Osteoporos Int,2010,21(8):1361-1369.

[41] Stengel S V,Kemmler W,Pintag R,et al. Power training is more effective than strength training for maintaining bone mineral density in postmenopausal women[J]. J Appl Physiol (1985),2005,99(1):181-188.

[42] Daly R M,Dalla Via J,Duckham R L,et al. Exercise for the prevention of osteoporosis in postmenopausal women: an evidence-based guide to the optimal prescription[J]. Braz J Phys Ther,2019,23(2):170-180.

[43] Stanghelle B,Bentzen H,Giangregorio L,et al. Effects of a resistance and balance exercise programme on physical fitness,health-related quality of life and fear of falling in older women with osteoporosis and vertebral fracture: a randomized controlled trial[J]. Osteoporos Int,2020, 31(6):1069-1078.

[44] Zhang F,Wang Z,Su H,et al. Effect of a home-based resistance exercise program in elderly participants with osteoporosis: a randomized controlled trial [J]. Osteoporos Int,2022,33(9):1937-1947.

[45] Rodrigues I B,Wang E,Keller H,et al. The MoveStrong program for promoting balance and functional strength training and adequate protein intake in pre-frail older adults:a pilot randomized controlled trial[J]. PLoS One, 2021,16(9):e0257742.

[46] Huang C C,Wang H H,Chen K C,et al. Effects of a dynamic combined training on impulse response for middle-aged and elderly patients with osteoporosis and knee osteoarthritis:a randomized control trial[J]. Aging Clin Exp Res,2021,33(1):115-123.

[47] Linhares D G,Borba-Pinheiro C J,Castro J B P,et al. Effects of multicomponent exercise training on the health of older women with osteoporosis: a systematic review and meta-analysis[J]. Int J Environ Res Public Health, 2022,19(21):14195.

[48] Talevski J,Gianoudis J,Bailey C A,et al. Effects of an 18-month community-based, multifaceted, exercise program on patient-reported outcomes in older adults at risk of fracture:secondary analysis of a randomised controlled trial[J]. Osteoporos Int,2023,34(5):891-900.

(收稿:2025-04-29)(修回:2025-11-30)

(责任编辑:何明)