

骨质疏松症“未病”状态下运动干预策略

杨瑜芪^{1,2} 孙传睿¹ 孙驰雲¹ 王晓阳^{1,2} 芦佳劲¹ 洛小珺¹ 章轶立³ 魏戌^{1*}

1. 中国中医科学院望京医院, 北京 100102
2. 陕西中医药大学中西医结合临床学院, 陕西 咸阳 712046
3. 南京中医药大学中西医结合学院, 江苏 南京 210023

中图分类号: R68; R211 文献标识码: A 文章编号: 1006-7108(2026)02-0211-06

摘要: 骨质疏松症(osteoporosis, OP)作为老龄化社会的高发性疾病,其早期防控已然成为全球公共卫生的优先议题。世界卫生组织全周期健康管理理念与中医“治未病”理论不谋而合,本团队提出以运动干预为核心的OP“未病”状态防控策略,关注OP发生、发展及转归的关键病理阶段,实现骨骼健康与生活质量的协同改善。未来需依托大规模多中心随机对照试验,构建“精准检测-个性干预-动态调控”多维健康管理体系,并融合智能传感技术与数据大模型工具,优化个体化干预路径,从而为“健康老龄化”目标提供循证支持。

关键词: 骨质疏松症; 未病; 治未病; 运动干预; 中西医结合

Exercise intervention strategies for osteoporosis in the “Pre-disease” state

YANG Yuqi^{1,2}, SUN Chuanrui¹, SUN Chiyun¹, WANG Xiaoyang^{1,2}, LU Jiajin¹, LUO Xiaojun¹, ZHANG Yili³, WEI Xu^{1*}

1. Wangjing Hospital, China Academy of Chinese Medical Sciences, Beijing 100102, China
2. Clinical College of Integrated Traditional Chinese and Western Medicine, Shaanxi University of Chinese Medicine, Xianyang 712046, China
3. College of Integrative Medicine, Nanjing University of Traditional Chinese Medicine, Nanjing 210023, China

* Corresponding author: WEI Xu, Email: weixu.007@163.com

Abstract: Osteoporosis (OP) is a high-incidence metabolic bone disease in the aging society, and its early prevention and control has become a priority issue of global public health. Based on the synergistic effect of the theory of “preventing disease before it occurs” in Chinese medicine and the concept of whole-cycle health management of the World Health Organization, our team has proposed the prevention and control strategy of “pre-disease” state of OP with exercise intervention as the core, which focuses on the key pathological stages of the occurrence, development, and prognosis of OP, and regulating the balance of bone metabolism, delaying bone mass loss and reducing the risk of fracture. Achieve synergistic improvement of bone health and quality of life. Evidence suggests that exercise interventions such as resistance training and weight-bearing aerobic exercise can significantly improve BMD. However, the lack of long-term compliance, unclear biomechanical mechanisms, and lack of interdisciplinary integration still limit clinical transformation. In the future, it is necessary to rely on large-scale multi-center randomized controlled trials to build a multi-dimensional health management system of “accurate detection – individualized intervention – dynamic regulation” and integrate intelligent sensing technology and data modeling tools to optimize the individualized intervention pathway, thus providing evidence-based support for the goal of “Healthy Aging”.

Key words: osteoporosis; prevention before illness (TCM concept); Pre-disease state of osteoporosis; exercise intervention; integration of traditional Chinese and Western medicine

骨质疏松症(osteoporosis, OP)是以骨密度(bone mineral density, BMD)下降、骨结构破坏、骨脆

性增加为主要病理特征的全身性代谢性骨病^[1],因其早期症状隐匿,常在发生骨折后确诊,且致残率、致死率、再骨折发生率高^[2],尤其髌部骨折患者的死亡风险将增加5~8倍^[3],给患者生活质量和公共卫生负担造成了严重影响。随着人口老龄化进程的加快和全民健康意识的增强,如何在OP发生之前

基金项目: 国家自然科学基金交叉学部“未病”专项项目(T2341023); 2022年青年岐黄学者培养项目

* 通信作者: 魏戌, Email: weixu.007@163.com

采取有效的预防措施逐渐得到关注,前期本团队提出实施“骨健康计划”,尤其是针对疾病进行早期筛查、有效干预和动态监测,形成OP诊疗的全程管理闭环^[4-5]。在“骨健康计划”的大背景下,本团队提出OP“未病”状态主要包括三种:①骨量正常但存在OP风险因素及跌倒风险,且伴有中医病理证候(如肾虚、脾虚、血瘀等)的状态^[6];②尚未出现病理性骨量丢失及骨折,但骨密度和骨质量已呈下降趋势的前期状态,例如出现下肢抽筋、乏力等临床症状以及骨小梁评分降低,钙磷和骨转换标志物异常等^[5];③骨密度介于正常与骨质疏松间的临界状态,即骨量减少期(双能X线检测, $-2.5 < T < -1.0$ 但更偏向于 $T < -2.0$),且FRAX评估骨折高风险,BMD年下降率 $\geq 2\%$ 或合并有长期代谢异常病史(如糖尿病、甲亢)^[1]。

针对该阶段药物治疗的局限性,运动疗法展现出独特优势。研究表明,运动锻炼对于多种OP类型都有良好的干预效果,12周的力量训练可以增强老年患者的骨密度,而40 min的高强度间歇训练可以立即提高白细胞介素-6(interleukin-6, IL-6)和骨形成标志物I型前胶原氨基端前肽(procollagen type I n-terminal propeptide, P1NP)的水平,增强骨形成且提高肌肉收缩能力,而连续16周的训练可以维持BMD的变化^[7-9]。值得关注的是,在“健康中国”战略背景下,本研究团队提出的“骨健康计划”及其针对OP“未病”状态的全程管理理念,正是对此战略背景的积极践行,从而为探索运动干预策略提供了坚实的理论框架与现实意义。

本综述旨在梳理运动干预在OP“未病”状态防控中的部分机制,通过整合现代医学研究成果与中医“未病先防”的理念,构建OP早期病理阶段的运动处方框架。其科学意义在于将WHO全周期健康管理理念与中医“未病”理论相结合,为建立具有中医特色、符合国人骨健康特征的OP三级预防体系提供理论支撑。

1 基于“未病”理念的运动干预中西医理论来源

“治未病”思想最早可追溯至《素问·四气调神大论》中“圣人不治已病治未病,不治已乱治未乱”。而后孙思邈在《备急千金要方》中将疾病分为“未病-欲病-已病”三期,指出“未病”是疾病发展转化的基础。中医认为,OP属“骨痿”“骨枯”范畴,其病机以肾精亏虚为本,兼见脾虚失运及气滞血瘀。

《内经》强调“上工治未病”,通过运动(如八段锦、太极拳)、饮食调养及情志调节,固护先天之肾与后天之脾,这与OP基本防治策略基本相似^[1]。系列研究也证实运动疗法可以通过机械应力刺激、内分泌调节等途径提高骨密度,改善骨代谢微环境^[8,10],可基于此构建具有中西医结合特色的诊疗体系,例如“风险评估→中医特色信息辨识→运动处方选择→骨代谢标志物监测”的相关路径,通过生物力学指标与中医辩证的结合,充分发挥中西医结合运动干预的优势。

2 骨质疏松症“未病”状态的运动干预机制概述

骨骼系统的稳态调控是通过成骨细胞介导的骨形成与破骨细胞主导的骨吸收之间的动态平衡实现的。随年龄增长,骨小梁微结构破坏,BMD进行性下降,骨代谢失衡。在OP“未病”状态下通过科学运动提前干预,能够从根源上维持骨代谢平衡,延缓BMD下降和骨结构破坏。干预作用机制主要通过三方面:①骨骼系统在承受肌肉收缩产生的机械负荷时会触发特定的分子调控机制,运动产生的机械应力通过骨骼肌周期性收缩传递至骨组织,经机械转导作用激活Wnt/ β -catenin信号通路,通常硬化蛋白通过与低密度脂蛋白受体相关蛋白6(low-density lipoprotein receptor-related protein 6, LRP6)胞外结构域的串联相互作用抑制Wnt信号传导^[11],而机械刺激则可以促使Wnt蛋白与细胞膜表面Frizzled受体及LRP5/6共受体结合,从而抑制 β -连环蛋白(β -catenin)磷酸化降解复合物的活性,促进 β -catenin向细胞核内转移;核内积累的 β -catenin与相关转录因子结合后,通过上调Runx2相关转录因子2(Runx2)、成骨细胞特异性转录因子(Osterix)等成骨关键转录因子表达,促使间充质干细胞(mesenchymal stem cells, MSCs)向成骨细胞分化^[12-14],同时激活碱性磷酸酶(alkaline phosphatase, ALP)、骨钙素(osteocalcin, OCN)及I型胶原蛋白 $\alpha 1$ 链(collagen type I alpha 1 chain, COL1A1)等骨基质合成相关基因的表达^[15],如图1左上画面所示的通过成骨通路促进成骨分化,同时也展示了另一种干预机制,即负重运动可以通过激活骨形态发生蛋白(bone morphogenetic protein, BMP)受体介导的Smad信号转导系统,其中BMP-2通过磷酸化Smad1/5/8复合体,促进Runx2等成骨转录因子表达,促进骨基质矿化,改善骨小梁三维结构的连续性^[16],最终

实现骨组织的适应性重建,这种机械刺激的骨形成机制为运动干预 OP “未病”状态提供了重要的理论依据;在破骨通路的干预机制方面,主要通过调节 OPG/RANKL 通路,抑制破骨细胞分化^[17],在骨量开始丢失前建立起保护屏障;②运动诱导的神经内分泌调节,可以通过“下丘脑-垂体-性腺”轴,促进雌激素内分泌稳态,提升血清雌激素水平,抑制破骨细胞活性及氧化应激反应^[18],既能减缓骨组织的氧化损伤,又能直接抑制破骨细胞的活动,从而构建多重骨保护屏障,这种调节在女性绝经前显得尤为重要;③肌肉-骨骼系统的双向调控也起着关键作用,肌肉在运动时通过肌腱对骨骼产生适度牵拉,这种持续的机械刺激会促使骨膜下的干细胞分化为成骨细胞,同时,骨骼感受到的力学变化又会通过神经信号反馈给肌肉,促使肌肉纤维增粗,形成“肌力增强-骨量提升”的良性循环^[19]。运动疗法通过多机制协同作用不仅能改善骨代谢环境,更重要的是在 OP “未病”状态下,能够强化骨骼系统储备能力以及减少骨量的丢失,从而延缓或避免 OP 的发生。

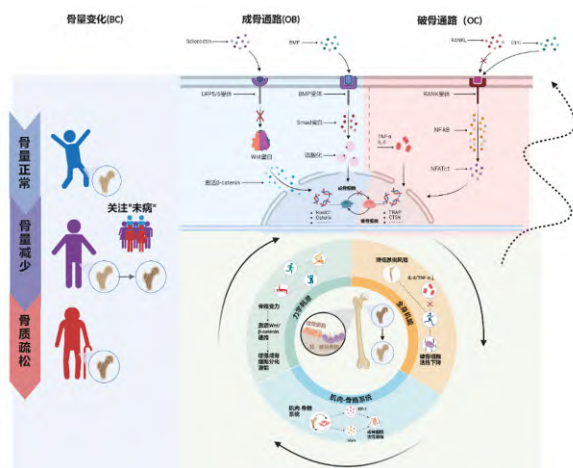


图1 运动疗法干预 OP “未病”状态的机制

Fig.1 Mechanism of exercise therapy intervention in OP “Pre-disease” states

3 骨质疏松症“未病”状态运动干预策略

3.1 建立个性化运动处方

运动处方的制定需结合个体的年龄性别、健康状况、运动能力及生物学特征,动态调整,精准干预。实施遵循“骨量生理变化”规律的动态调整与精准干预。首先,骨量增长期(青春期,约10~20岁)是骨量峰值形成的关键期,这一时期应通过高强度机械应力刺激骨形成,促进峰值骨量的积累,预防骨量的丢失以及建立长期运动习惯,为后期骨健康奠定

基础,推荐每周3~4次、每组8~12次的深蹲、卧推、引体向上等运动,并结合哑铃、杠铃等器械做抗阻训练,促进成骨分化;或进行每周2~3次、每次10~15 min的冲击性负重运动,如负重跳绳,其BMD较常规运动提高更明显^[20],也可以进行瑜伽、普拉提等功能性平衡与柔韧性训练,提升关节稳定性,预防运动损伤,同时配合足量蛋白质[1.2~1.5 g/(kg·d)]及钙摄入(1200 mg/d)优化骨矿沉积效率^[21]。其次,进入骨量峰值维持期(成年期,约20岁至骨量流失加速拐点前),此阶段的核心任务是维持已获得的峰值骨量,延缓生理性流失。运动处方应延续并维持青春期的有效抗阻与冲击性运动模式,形成规律、可持续的终身习惯(如每周2~3次中等强度训练),为骨骼提供持续的良性刺激。最后,当进入骨量加速流失期(通常始于女性围绝经期、男性50岁后),运动重点须转向“防御性”策略,应以维持骨密度、减缓骨量丢失和增强肌肉力量与平衡能力从而预防跌倒骨折为主,同时需要注意运动频率的影响。研究表明,较高(每周≥2次)的训练频率与较低的训练频率(每周<2次),与腰骶部和髋部的BMD治疗效果相关,尤其是腰骶部BMD变化的巨大差异值得更频繁地训练^[22],推荐每周进行3次以上、每次30~40 min的低冲击有氧运动,或者进行每组12~15次重复的渐进性力量训练增强肌力,降低骨折风险。但考虑老年人身体情况,建议心率控制在最大心率的60%~70%,另外结合自身情况进行适当调整,同时也可以选择每周3次、每次20 min的单腿站立、太极等平衡与协调性训练,减少跌倒风险,有研究显示65岁以上群体实施太极拳干预可显著降低腰椎骨量丢失,同时降低跌倒风险^[23]。

另外,性别差异也较为明显,一项随机对照试验显示,弹力带抗阻训练可使绝经后女性股骨颈BMD提高,Berg平衡量表评分改善^[24-25],因此对于绝经后女性更适合抗阻训练,太极拳对于女性腰椎BMD的改善也显著高于男性^[26],尽管部分研究说明力量训练对男性BMD有改善,但仍需更多循证支持。

针对特殊人群 OP 患者,运动干预需结合其病理特征与代谢失衡机制设计差异化策略。针对血液透析患者,渐进式抗阻训练可通过降低血清抗酒石酸酸性磷酸酶5b(TRACP-5b)水平^[27],抑制破骨细胞活性,可以在透析间期结合自身情况进行坐姿腿部推举、弹力带带肘屈伸等避免高冲击的运动,同时可以通过检测血清 TRACP-5b 水平和甲状旁腺素评

估抑制效果,另外需要注意透析患者的肌力与心血管耐受性低下,建议采用分阶段负荷递增的策略,实现骨代谢稳态调控;对于OP合并肌少症患者,可以以自觉稍累为准进行每周3~4次的有氧运动联合抗阻训练方案,改善肌肉质量与骨强度,且有效减缓BMD年丢失率^[28],也可以穿插平衡训练预防跌倒,但需要警惕过度有氧运动诱发肌肉分解,建议采用以抗阻优先、有氧补充的模式;在2型糖尿病合并OP人群中,12周弹力带干预能特异性提升血清骨钙素浓度^[29],从而激活成骨细胞功能,可以使用中等阻力带(15~20磅),进行每周3~5次、每组12~15次的弹力带干预,但应注意运动时间固定于餐后1h,且同步检测血糖波动。总之特殊人群的运动干预需以病理机制为靶点,通过标志物动态监测实现精准调控。

3.2 利用新技术增强干预效果

现代运动医学强调通过多模式整合,增强干预效果,而智能技术革新为精准干预提供了新路径^[30]。结合智能新技术的应用,构建“智能传感-动态解析-精准服务”三级联动的防控体系,实现从数据采集到行为干预的全周期智能健康管理。首先构建OP骨折的风险预测模型^[31],建立OP“未病”状态的智能监测系统,例如通过骨代谢无创检测技术、以及智能穿戴设备等实现数据实时采集;另外还可以利用虚拟现实、三维运动场景等,提高患者依从性,也为后续研究中解析其作用机制提供了工具^[32];同时利用表面肌电传感器可以实时监测核心肌群激活度以及肌肉力量和疲劳度^[33],为运动干预提供动态调整标准;还可以借助康复机器人,利用智能外骨骼装置为重度OP患者提供渐进式力学刺激,提高干预效率。

3.3 发挥中西医优势联合干预

中医传统功法与现代运动医学的协同效应,本质上体现了“整体调控”与“靶向干预”的互补优势。西医基于力学-生物学耦合机制,强调通过机械应力激活骨细胞Wnt/ β -catenin信号通路,促进成骨分化,其运动处方多聚焦于局部骨骼的力学刺激(如弹力带抗阻诱导的肌骨协同收缩)。而中医“形-气-神”三位一体理论,则通过功法动作、经络刺激与精神调摄,系统性调节气血运行与脏腑功能,进而改善骨骼微环境,例如太极拳“云手”动作通过腰椎旋转刺激肾俞穴,促进骨钙素分泌调节骨代谢环境^[34]。其次,可以将中医体质辨识与经络调节结合,制定个性化运动方案,例如阳虚者可以采用日光下“五禽

戏”配合涌泉穴按摩,通过督脉温煦、动作刺激双重作用增强干预效果;气虚者可以选择太极拳、八段锦这类通过缓慢动作调节呼吸,或结合低强度有氧运动增强气血循环,并在运动后艾灸足三里穴增强脾胃的运化功能;而湿热体质则应该进行高强度间歇性训练并配合拍打胆经促进排汗除湿,运动后可以饮用赤小豆、荷叶茶等清热利湿;气郁体质可以多做八段锦中“左右开弓似射雕”这类舒展胸肺部肝经的动作,也可以配合一些羽毛球、广场舞等团体运动改善情绪,并在运动后进行冥想,日常饮用玫瑰花茶等及时调整自我情绪。另外也可以将西医“骨重建周期”与中医“子午流注”理论结合起来,因人因时选择适合的运动方式。例如晨间进行承重运动以应“阳气升发”,傍晚实施导引术调和阴阳;夏季清晨多做跳跃、舒展的户外运动,冬季则可以加强督脉推拿及室内抗阻训练,顺应“冬藏精”的养生原则,还需要根据实际情况结合西医的一些评估进行有效干预,比如骨密度数值、FRAX骨折风险评分、血清骨代谢标志物、血糖水平等指标联合中医的舌脉诊察、体质辨识等,根据个体差异建立个性化的运动方案,并联合智能新技术,如图2所示从多维度构建完整的“因人制宜”的运动干预策略。

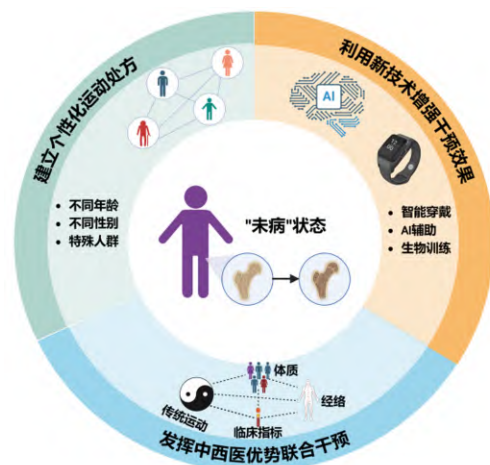


图2 运动疗法干预OP“未病”状态策略

Fig.2 Exercise therapy intervention strategies for OP “Pre-disease” states

4 小结与展望

OP“未病”状态的早期防控需以中医“治未病”理论与现代全周期健康管理理念为核心,构建多维度的干预体系。一方面要制定精准干预策略,整合多组学(基因组、代谢组)与表观遗传学数据,结合遗传背景、生活方式及环境因素,建立动态化干预阈

值。例如,通过BMD筛查纳入常规体检的高危人群数据,明确OP“未病”状态具体指征,动态调整运动强度与营养方案,实现早筛早防^[35];另一方面要有高质量循证证据验证,通过开展大规模多中心RCT,明确不同运动类型(如抗阻训练、传统功法)对骨代谢标志物(如CTX、PINP)及骨微结构的特异性调控效应;还可以利用智能技术赋能,开发AI驱动的个性化运动处方系统,基于实时生物力学参数(如关节负荷、步态分析)与中医体质特征动态优化方案;另外,深度融合中西医优势,将中医传统运动与骨代谢组学、运动生物力学及营养组学结合,构建病证结合的风险预测模型^[36],多途径多角度的进行研究分析,达到精准干预;此外,还需要关注骨折患者的焦虑抑郁情绪,结合社区健康宣传和家庭关怀,提升患者依从性,降低骨折发生率。

综上所述,通过“精准筛查-动态干预-多维调控”路径,可显著提升OP“未病”状态防控效能,为“骨健康计划”与“健康老龄化”目标提供科学支撑,减轻公共卫生负担。但未来仍需强化跨学科协作,推动从理论创新到临床转化。

【 参 考 文 献 】

- [1] 中华医学会骨质疏松和骨矿盐疾病分会. 原发性骨质疏松症诊疗指南(2022) [J]. 中华内分泌代谢杂志, 2023, 39(5): 377-406.
- [2] 邱贵兴, 裴福兴, 胡侦明, 等. 中国骨质疏松性骨折诊疗指南(骨质疏松性骨折诊断及治疗原则) [J]. 中华骨与关节外科杂志, 2015, 5: 371-374.
- [3] Guzon-Illescas O, Perez Fernandez E, Crespi Villarias N, et al. Mortality after osteoporotic hip fracture: Incidence, trends, and associated factors [J]. Journal of Orthopaedic Surgery and Research, 2019, 14: 1-9.
- [4] 朱立国, 魏戎, 章轶立. 构建中医药防控体系对实施骨健康计划的战略意义[J]. 中国骨伤, 2024, 37(1): 1-2.
- [5] 章轶立, 孙传睿, 孙凯, 等. 从“骨健康计划”视角观照中医药防治骨质疏松症的时代价值与新思路[J]. 中国中药杂志, 2025, 50(3): 569-574.
- [6] 吴海龙. 骨质疏松“未病”风险评估及骨痠胶囊促进成骨的生物学机制研究[D]. 长春: 长春中医药大学, 2023.
- [7] Chang X, Xu S, Zhang H. Regulation of bone health through physical exercise: Mechanisms and types. Front Endocrinol (Lausanne), 2022, 13: 1029475.
- [8] Muollo V, Hvid LG, Shanbhogue VV, et al. Effects of 12-week power training on bone in mobility-limited older adults: Randomised controlled trial[J]. Archives of Osteoporosis, 2024, 20(1): 5.
- [9] Sasimontokul S, Sirivarasai J. The 40-min HIIT acutely induced bone formation which was likely through the increases in muscle derived interleukin 6 and adiponectin activation: The 16 weeks of HIIT intervention, longitudinal randomized controlled trial [J]. Bone, 2024, 184: 117105.
- [10] Yu YG, Zhang J, Wang L, et al. Comparative study of Baduanjin and brisk walking on balance and stability in older adults [J]. Experimental Gerontology, 2025, 201: 112687.
- [11] Kim J, Han W, Park T, et al. Sclerostin inhibits Wnt signaling through tandem interaction with two LRP6 ectodomains. Nat Commun, 2022, 11(1): 5357.
- [12] 张帆, 梁清洋, 韩超, 等. Wnt/ β -catenin 信号通路调控成骨细胞、破骨细胞在骨质疏松中的作用探讨[J]. 中国骨质疏松杂志, 2021, 27(10): 1540-1544.
- [13] 王浩渊, 邵阳, 汪国澎, 等. Wnt/ β -catenin 信号通路在骨质疏松症环境下促进成骨的研究进展[J]. 分子诊断与治疗杂志, 2023, 15(4): 720-724.
- [14] An F, Song J, Chang W, et al. Research progress on the mechanism of the SFRP-mediated Wnt Signalling pathway involved in bone metabolism in osteoporosis[J]. Mol Biotechnol, 2024, 66(5): 975-990.
- [15] 余鹏, 孟东方, 李慧英, 等. 松脂醇二葡萄糖苷激活 Wnt/ β -catenin 信号通路保护成骨细胞[J]. 中国组织工程研究, 2025, 29(2): 339-346.
- [16] 何淑敏, 陈明. 耐力训练对生长期大鼠血清 OPG、sRANKL 及骨代谢生化因子、骨量的影响[J]. 中国运动医学杂志, 2010, 29(5): 560-562.
- [17] Fan J, Zhang X, Kang M, et al. Complementary modulation of BMP signaling improves bone healing efficiency [J]. Biomaterials, 2023, 302: 122335.
- [18] 张云丽, 王林. 运动对下丘脑-垂体-性腺轴功能影响的研究进展[J]. 辽宁体育科技, 2004, 26(2): 28-29.
- [19] 林华, 谢忠建, 朱梅, 等. 肌肉和骨骼的相互调节[J]. 中华骨质疏松和骨矿盐疾病杂志, 2016, 9(3): 236-239.
- [20] 《中国骨质疏松杂志》骨代谢专家组. 骨代谢生化指标临床应用专家共识(2023 修订版) [J]. 中国骨质疏松杂志, 2023, 29(4): 469-476.
- [21] Rizzoli R. Nutritional aspects of bone health [J]. Best Practice & Research Clinical Endocrinology & Metabolism, 2014, 28(6): 795-808.
- [22] Zitzmann AL, Shojaa M, Kast S, et al. The effect of different training frequency on bone mineral density in older adults. A comparative systematic review and meta-analysis [J]. Bone, 2022, 154: 116230.
- [23] 邹雲鹏. 太极拳和抗阻运动对老年女性骨骼肌质量和身体机能的影响[D]. 大连: 辽宁师范大学, 2020.
- [24] 常永玲, 刘鑫. 运动干预对心血管和骨质疏松合并症影响的研究进展[J]. 当代体育科技, 2024, 14(11): 11-14.
- [25] 李天. 弹力带抗阻训练对绝经女性骨密度和体质指数的影响[J]. 黑龙江科学, 2024, 15(12): 137-139.
- [26] 朱茜, 周艳, 孙思露, 等. 绝经后骨质疏松症干预方式的研究进展[J]. 中国医学创新, 2024, 21(2): 156-160.

(下转第 222 页)

- HDAC3 and STAT1//NF- κ B p65 to chondrocytes [J]. *Mediators of Inflammation*, 2021, 2021: 9972805.
- [68] Xia S, Zhang Z, Magupalli VG, et al. Gasdermin D pore structure reveals preferential release of mature interleukin-1 [J]. *Nature*, 2021, 593(7860): 607-611.
- [69] He X, Wu T, He H, et al. Study of kaempferol in the treatment of rheumatoid arthritis through modulation of the NLRP3/CASP1/GSDMD axis and T-cell activation: based on network pharmacology, single-cell analysis, and experimental validation [J]. *International Immunopharmacology*, 2024, 143: 113357.
- [70] Fan Y, Wang Y, Zhang W, et al. From bioinformatics to anti-inflammation and immune regulation: ACT001 in lipopolysaccharide-induced lung injury [J]. *Allergologia et Immunopathologia*, 2024, 52(6): 151-161.
- [71] Liu H, Zheng J, Lai HC, et al. Microbiome technology empowers the development of traditional Chinese medicine [J]. *Science China. Life Sciences*, 2020, 63(11): 1759-1761.
- [72] 叶锋浩, 旷武龙, 蒋宜伟, 等. T细胞与骨质疏松症相关性及中医药干预研究进展 [J]. *中国骨质疏松杂志*, 2024, 30(12): 1804-1809.
(收稿日期: 2025-02-27; 修回日期: 2025-03-22)

(上接第210页)

- [23] Kadomoto S, Izumi K, Mizokami A. The CCL20-CCR6 axis in cancer progression [J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2020, 21(15): 5186.
- [24] Li L, Zhou J, Xu Y, et al. C-C chemokine receptor type 6 modulates the biological function of osteoblastogenesis by altering the expression levels of Osterix and OPG/RANKL [J]. *Bioscience Trends*, 2021, 15(4): 240-248.
- [25] Liu Y, Wang J, Ni T, et al. CCL20 mediates RANK/RANKL-induced epithelial-mesenchymal transition in endometrial cancer cells [J]. *Oncotarget*, 2016, 7(18): 25328-25339.
- [26] Bassiouni W, Ali MAM, Schulz R. Multifunctional intracellular matrix metalloproteinases: Implications in disease [J]. *FEBS Journal*, 2021, 288(24): 7162-7182.
- [27] Sugiharto S, Salmah S, Fauziah E, et al. The potential calcium content of anchovy (*Stolephorus* sp.) on mandibular bone growth through osteoprotegerin expression analysis [J]. *Journal of Oral and Maxillofacial Pathology*, 2024, 28(3): 374-380.
- [28] Wawrzyniak A, Balawender K. Structural and metabolic changes in bone [J]. *Animals (Basel)*, 2022, 12(15): 1946.
- [29] Dasen B, Pigeot S, Born GM, et al. T-cadherin is a novel regulator of pericyte function during angiogenesis [J]. *American Journal of Physiology-Cell Physiology*, 2023, 324(4): C821-C836.
- [30] Nita G. The role of RANKL and FGF23 in assessing bone turnover in type 2 diabetic patients [J]. *Acta Endocrinologica (Bucharest)*, 2021, 17(1): 51-59.
- [31] Hellberg S, Raffetseder J, Rundquist O, et al. Progesterone dampens immune responses in in vitro activated CD4+ T cells and affects genes associated with autoimmune diseases that improve during pregnancy [J]. *Frontiers in Immunology*, 2021, 12: 672168.
- [32] Li B, Wang P, Jiao J, et al. Roles of the RANKL-RANK axis in immunity—implications for pathogenesis and treatment of bone metastasis [J]. *Frontiers in Immunology*, 2022, 13: 824117.
- [33] 高增杰, 蒲翔, 李来来, 等. 甾醇酯增加骨质疏松病理性骨折风险: 来自 IEU-GWAS 与芬兰数据库的证据 [J]. *中国组织工程研究*, 2026, 30(5): 1302-1310.
(收稿日期: 2025-02-26; 修回日期: 2025-03-20)

(上接第215页)

- [27] 苗佳怡, 张谊雯, 张立元. 有氧运动联合抗阻运动对维持性血液透析患者脂代谢、骨质疏松及血压的影响 [J]. *中国中西医结合肾病杂志*, 2021, 22(10): 911-913.
- [28] 徐帅, 赵常红, 徐道明, 等. 肌骨交互视阈下肌骨共减综合症的生物学机制及其运动干预研究进展 [J]. *中国体育科技*, 2022, 58(5): 75-83.
- [29] 阮诗慧, 刘琳, 章玉玲, 等. 弹力带抗阻运动对2型糖尿病合并骨质疏松中老年患者的影响研究 [J]. *现代医药卫生*, 2024, 40(19): 3320-3325.
- [30] Miller MI, Brightman AO, Epstein FH, et al. BME 2.0: Engineering the future of medicine [J]. *BME frontiers*, 2023, 4: 0001.
- [31] Xia PF, Jiang YQ, Cai F, et al. Construction and verification of risk prediction model of osteoporotic fractures in patients with osteoporosis in China [J]. *Frontiers in Public Health*, 2024, 12: 1380218.
- [32] Xu Z, Lu J, Pan W, et al. Fatigue analysis of upper limb rehabilitation based on surface electromyography signal and motion capture [J]. *Journal of Biomedical Engineering*, 2022, 39(1): 92-102.
- [33] Gong Q, Jiang X, Liu Y, et al. A flexible wireless sEMG system for wearable muscle strength and fatigue monitoring in real time [J]. *Advanced Electronic Materials*, 2023, 9(9): 2200916.
- [34] Wayne PM, Kiel DP, Krebs DE, et al. The effects of Tai Chi on bone mineral density in postmenopausal women: A systematic review [J]. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 2007, 88(5): 673-680.
- [35] 张亚兰, 周杰, 程真, 等. 绝经后骨质疏松症早期筛查及干预研究进展 [J]. *中华健康管理学杂志*, 2024, 18(2): 146-150.
- [36] 魏戌, 刘宁, 章轶立, 等. 骨质疏松症的共病研究与早期筛查 [J]. *中国全科医学*, 2022, 25(35): 4369-4374.
(收稿日期: 2025-03-05; 修回日期: 2025-04-06)