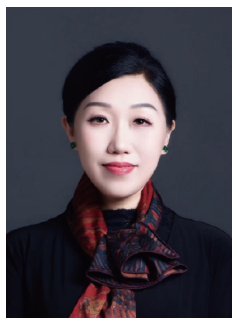


DOI: 10.3724/cbls.2026138

CSTR: 32203.14.cbls.2026138

文章编号: 1004-0374(2026)09-1607-13



王慧,上海交通大学二级教授、特聘教授、博士生导师,公共卫生学院院长、数字医学研究院执行院长、医学院单细胞组学与疾病研究中心中方主任,海南国际医学中心数智医学研究院院长,上海市黄浦区侨联主席,上海交通大学医学院侨联主席。国家杰出青年科学基金获得者、国家百千万人才工程入选者、中国青年女科学家奖获得者、国务院特殊津贴专家、吴杨奖获得者、中国科学院百人计划入选者,上海市三八红旗手、五一劳动奖章获得者,上海市优秀学术带头人,上海市领军人才,上海交通大学校长奖获得者。任国务院食品安全委员会专家委员会委员、国家健康科普专家、中国营养科学界首席专家,第一届食品安全国家标准审评委员会微生物分委员会主任委员、中国检验检测学会数智主动健康产业协同创新中心主任,上海市食品安全风险评估专家委员会膳食营养专业委员会主任委员,上海市毒理学会理事长,上海市大数据社会应用研究会数字健康专委会主任委员,上海市侨界专业人士联谊会首任轮值会长等。长期从事主动健康、慢病防控与营养食品安全研究,Elsevier高被引学者,科技部重点专项首席科学家。在*Nature*、*JAMA*等发表论文260余篇,主编专著9部,申请专利60项,成果转化7项,形成国家、行业标准25项,获全国优秀科普微视频作品奖、上海市健康科普推优选树“杰出人物”、上海市“科普之星”、上海市课程思政教学设计展示活动特等奖、上海市优秀教学成果一等奖等。



杨阳,上海交通大学公共卫生学院副研究员、硕士研究生导师。先后获上海市东方英才计划青年项目、上海市启明星项目扬帆专项、上海市超级博士后激励计划等项目支持,并获九龙医学优秀青年人才奖。从事主动健康与肝脏疾病的精准防治研究工作,以第一或通讯作者身份在*Gut*、*Nature Communications*、*Cell Reports Medicine*、*Journal for Immunotherapy of Cancer*、*Hypertension*、*Cardiovascular Diabetology*、*Clinical and Translational Medicine*等国际一流杂志发表SCI论文14篇,其中ESI高被引论文2篇。主持国家自然科学基金青年项目等各类科研项目6项。担任多本SCI期刊编委及青年编委。

人工智能技术赋能间歇性禁食的健康效应解析及其转化应用

张程皓,杨 阳*,王 慧*

(上海交通大学公共卫生学院,上海 200025)

摘要: 间歇性禁食(intermittent fasting, IF)作为一种非药物干预策略,通过调控代谢重编程、增强细胞应激抵抗和重塑免疫微环境等机制,在促进健康及防治慢性非传染性疾病中展现出显著潜力。人工智能(artificial intelligence, AI)技术的迅速发展,为多模态数据整合、复杂机制解析及个体化干预优化提供了创新工具。本文系统综述了AI技

收稿日期:2026-02-03; 修回日期:2026-04-01

基金项目:国家重点研发计划揭榜挂帅项目(2022YFD2101500);国家自然科学基金项目(82403381);四大慢病重大专项(2026ZB0556800)

*通信作者: huiwang@shsmu.edu.cn(王慧); yyang93@shsmu.edu.cn(杨阳)

术在揭示IF健康效应中的应用进展,重点探讨其在代谢调控、细胞应激反应与免疫调节机制解析中的作用,并评估其在个体化干预方案制定与动态监测中的潜在价值。通过结合多组学数据与机器学习(machine learning, ML)模型, AI技术为识别在IF中发挥作用的关键分子通路及预测健康获益提供了新的分析范式。最后,本文讨论了当前AI在饮食干预机制研究中面临的数据标准化、模型可解释性与跨场景泛化等挑战,并展望了AI驱动的精准确营养与主动健康管理的未来方向。总之, AI技术正推动IF研究从经验性探索迈向机制性与个体化的新阶段,为慢病防控和健康促进提供了更科学、更精准的策略支撑。

关键词: 间歇性禁食;人工智能;慢病预防;营养;多组学

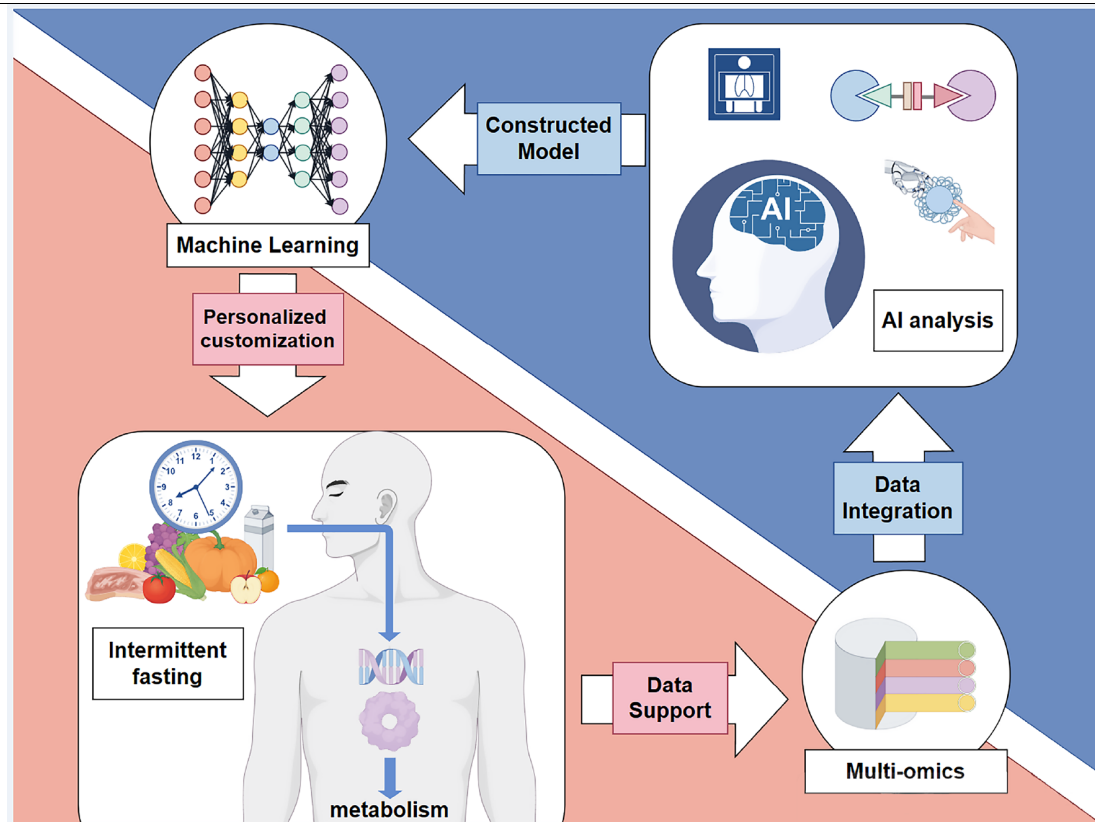
中图分类号: Q493; TP18 **文献标识码:** A

Analysis of the health effects of intermittent fasting empowered by artificial intelligence and its translational application

ZHANG Cheng-Hao, YANG Yang*, WANG Hui*

(School of Public Health, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200025, China)

Abstract: Chronic non-communicable diseases (NCDs) constitute a severe threat to the health of residents in China, impairing patients' quality of life and imposing a heavy burden on individuals and society due to the rising costs of prevention and treatment. Currently, the focus of NCD prevention has shifted toward dietary intervention, a kind of non-invasive strategy: Formulate personalized dietary regimens based on patients' disease-specific physiological characteristics and integrate them into daily life to effectively slow disease progression and reduce related burdens to individuals and society. Among dietary strategies, intermittent fasting (IF) has demonstrated significant potential in promoting health and preventing NCDs through mechanisms including metabolic reprogramming regulation, enhanced cellular stress resistance, and immune microenvironment remodeling. As an emerging dietary pattern, IF exerts metabolic effects through complex multi-level pathways. Diverse fasting protocols further expand the associated pathways and mechanisms. Comprehensive multi-omics analysis is therefore crucial to elucidate the specific characteristic mechanisms of each fasting mode and integrate core pathways of IF, thereby fully clarifying its health impacts. The rapid advancement of artificial intelligence (AI) technology shows promises in early diagnosis, dynamic monitoring, multi-dimensional data interpretation, and key information extraction. It provides innovative tools for multi-omics data integration, complex mechanism decipherment, and individualized intervention optimization. This review systematically summarizes the progress of AI applications in uncovering IF's health effects. It focuses on AI's roles in decoding metabolic regulation, cellular stress response, and immune modulation mechanisms, and evaluates its potential value in formulating personalized interventions and conducting dynamic diagnostic monitoring. By integrating multi-omics data with machine learning (ML) models, AI offers a novel analytical paradigm for identifying key molecular pathways of IF and predicting its health benefits. Finally, the review discusses current challenges of AI in dietary intervention research, such as data standardization, model interpretability, and cross-scenario generalization. It also prospects the future of AI-driven precision nutrition and proactive health management. Overall, AI is propelling IF research from empirical exploration to a new stage of mechanistic understanding and individualization, providing more scientific and precise support for NCD prevention, control, and health promotion.



Key words: intermittent fasting; artificial intelligence; chronic disease prevention; nutrition; multi-omics

慢性非传染性疾病(慢性病)(chronic non-communicable diseases, NCDs)严重威胁我国居民健康,不仅降低患者生活质量,其防治费用持续增长也给个人和社会带来沉重负担。2010年至2023年,全球慢性病绝对负担大幅上升,从14.5亿增至18亿失能调整生命年(disability-adjusted life years, DALY)^[1]。据统计,2021年慢性病导致约4 300万人死亡,占同期非流行性死亡的75%,其中约1 800万人死于70岁以下的“过早死亡”,82%发生在中低收入国家^[2]。中国2021年由慢性病导致的死亡人数约1 060万,占全国总死亡人数的91%,占全球慢病相关死亡人数的25.9%^[3]。因此,慢性病已成为公共卫生与预防医学领域面临的重大挑战。为使慢性病防治工作走出稳健而坚实的步伐,我国持续制定慢性病防治相关政策,如《“健康中国2030”规划纲要》,在慢性病预防和控制方面引入了更积极的方法,与世界卫生组织的全球战略保持一致^[2-4]。

大量研究已证实健康的膳食模式在预防和控制慢性病中发挥着关键作用^[5-7],因此,慢性病防治领域逐渐将目光聚焦于膳食策略的革新。其中,热量限制饮食在保证必需营养素摄入的前提下,通过减

少20%~40%的总热量摄入来激活AMPK/SIRT1等代谢调控通路,进而表现出延长健康寿命的生物学效应^[8]。作为热量限制饮食的衍生模式,间歇性禁食(intermittent fasting, IF)以调控饮食周期的进食窗口为核心策略,本质上是一种基于周期性进食与禁食循环的饮食模式。通过重构摄食-禁食周期使机体产生代谢压力,从而触发细胞自噬反应激活和干细胞再生等代谢调节相关的生物反应^[9,10]。目前IF的主要模式包含限时进食(time-restricted eating, TRE)、模拟禁食饮食(fasting-mimicking diets, FMD)、隔日禁食(alternate-day fasting, ADF)和5:2禁食法(5:2 intermittent fasting, 5:2 IF)等。IF各类主要模式对于健康效应的影响有所不同^[8,9,11-14],且大多数研究都只进行了短期干预,但总体上都被证明具有减轻体重及调节身体健康的作用^[15]。多组学技术的革新为揭示IF的多维调节功能提供了关键技术支撑。研究人员通过整合代谢组学与蛋白质组学数据联合分析发现,IF可显著调控多条核心能量代谢通路、肠道菌群代谢稳态或减轻神经炎症等,多途径协同发挥生理健康效应^[9,10]。然而,一方面,精准解析IF相关的多维度、多通路、多效应的健

康调节特征,以及检测与探索IF长期干预的效应,对现有分析技术的系统性解析能力构成了挑战;另一方面,临床上个性化IF饮食方案的制定进一步增加了开发新型分析工具的需求。

在此背景下,已在多个医学领域展现出强大数据分析与深度挖掘能力的人工智能(artificial intelligence, AI)技术,为探索开发个性化IF方案开辟了新方向^[16]。在疾病精准干预领域, AI 技术通过整合多组学数据构建的预测模型,已成功解析肿瘤代谢依赖网络,为精准靶向治疗方案的制定提供辅助^[17]。此外,多模态AI系统可整合基因组数据、影像学资料及电子健康记录等多源信息,建立双相情感障碍的精准医疗模式,实现患者分层分析与干预指导^[18]。更重要的是,在个性化饮食管理领域, AI技术的应用潜力已得到验证。AI既能通过整合海量多组学数据^[19]或肠道菌群数据^[20]开展机制性解析,也可以为临床或日常生活提供饮食定制指导^[21],显著提升IF健康效应探索的深度和广度。但基于AI开发的膳食方案作为新兴技术与饮食方案的结合,仍然需要更多更具说服力的研究证据进行验证和完善。因此,本文旨在基于多模态组学数据,综述IF对健康的调控机制,并探讨AI技术在解析IF延缓慢性病过程中的独特优势,为该领域深入研究提供参考。

1 间歇性禁食与健康效应的相关基础研究概述

1.1 间歇性禁食的基本生理与代谢效应

IF作为一种非药物干预方式,在动物和人类研究中都被证实具有显著的调节机体健康效应的作用,包括改善代谢功能、增强心血管功能、提高认知能力、调节肠道菌群等。在代谢方面,IF可以调节胰岛素敏感性,促进脂肪代谢,降低体重和改善内脏脂肪堆积^[10, 22-28]。在心血管方面,IF可以降低血压、改善血脂异常、减少心血管疾病风险因素^[28-32]。在认知方面,IF可以促进神经递质合成和释放,增强神经元连接,提高学习和记忆能力,防治神经退行性疾病^[33-37]。在肠道菌群方面,IF可以重塑肠道菌群组成、调节有益有害菌丰度、改善肠道菌群代谢等^[29, 33]。然而,IF同样存在不可忽视的副作用,如餐前低血糖、基础代谢率下降、压力激素皮质醇升高、女性月经异常、肌肉流失和脱发等^[38-44]。因此,深入研究IF与机体健康之间的关联,以及其背

后的潜在机制,对于防控慢性病、改善健康状况具有重要意义。

1.2 间歇性禁食健康效应的多层次分子机制解析

IF在微观层面的调节机制是复杂且多层次的。它并非通过单一通路起作用,而是作为一个代谢“重置”开关,通过内分泌代谢调控、机体能量感应与生物节律以及免疫重塑等协同作用网络,从细胞器到组织再到整个生物体,全方位地促进健康。

在内分泌调控机制方面,IF不仅可直接靶向调控能量代谢相关内分泌通路,还能通过调控多种激素信号及下游分子通路发挥多维度健康获益效应。在代谢相关疾病领域,糖尿病模型小鼠研究证实IF可通过减少糖脂毒性蓄积、下调Pck1和G6pc等糖异生关键基因的转录表达,减少胰岛 β 细胞功能损伤并维持其分泌稳态^[25];在退行性关节疾病中,人体与啮齿动物实验均表明IF能够逆转神经肽Y(NPY)的异常高分泌状态,显著缓解内侧半月板损伤诱导的或自然衰老相关的骨关节炎病理表现,包括关节软骨退变、滑膜炎浸润及关节功能下降^[45];此外,代谢组学研究数据显示,热量限制与IF联合干预可显著重塑老年雌性小鼠的血清代谢组谱,通过调节氨基酸、脂质及碳水化合物等代谢底物的稳态平衡,实现寿命延长及代谢健康改善的双重效应^[46]。在心血管疾病早期结合IF治疗的研究显示,对于老年高血压小鼠,ADF通过恢复肾素-血管紧张素系统的平衡,并上调 α -klotho蛋白的表达,显著降低血压^[47];另一项在中国9个中心开展的随机对照试验发现,与二甲双胍或恩格列净相比,5:2 IF在短期内可更好地改善血糖指标和减轻体重^[48]。

在代谢调节与能量感应方面,IF通过调节细胞感知能量状态的变化,使机体相应地发生适应性的调节。研究表明,昼夜节律驱动的TRE能够同步线粒体代谢节律,通过调控机体生物节律相关基因*Clock/Bmal1*,提高小鼠运动耐力^[49]。此外,AMPK γ 1复合体被鉴定为与年龄相关的禁食样反应的关键介质,在禁食和衰老期间AMPK γ 1的表达均下调,并且其慢性激活可防止禁食样转录程序(FLTP)^[50]。长期IF能够通过激活AMPK信号提高心脏能量代谢效率,并重塑细胞内线粒体功能网络,对维持心脏功能具有重要意义^[30]。进一步整合蛋白质组与代谢组分析显示,IF能够通过抑制HNF4 α 信号通路,减少甘油三酯在肝脏中的积累^[27]。

在炎症调控与细胞应激应答方面,IF可通过介导机体代谢重编程,动态调节体内营养底物稳态及激素信号网络,进而靶向调控多条关键分子通路,发挥其健康调控效应。具体而言,IF通过下调TNF- α 、IL-6等促炎细胞因子的转录与表达水平,同时促进酮体生成,联合抑制中枢神经系统的神经炎症反应,进而改善动物模型的焦虑样与抑郁样行为表型,为神经退行性疾病(如阿尔茨海默病、帕金森病)的防治提供了潜在干预策略^[33,34]。此外,在代谢相关炎症领域,IF可通过调控FXR/GLP-1/MC4R/PPAR- γ 信号通路级联反应,显著缓解高脂饮食诱导的大鼠肠道黏膜炎症浸润及糖脂代谢紊乱,改善肠道屏障功能^[51]。值得注意的是,IF介导的细胞应激应答具有双重性,可能存在潜在副作用,一项小鼠模型研究显示,IF可选择性诱导活化状态的毛囊干细胞发生凋亡,进而抑制毛囊周期的再生过程^[44]。该发现提示,IF对不同组织干细胞群的应激调控机制存在异质性,其细胞特异性效应及下游信号通路的精准调控网络仍需进一步深入探索。

1.3 多种禁食方式健康效应的差异性

IF包括多种干预模式,如TRE、FMD、ADF以及5:2 IF等,这些模式在减重以及调节代谢方面具有多种类似的功效,但在具体的分子机制方面具有显著的差异。

TRE每日定时禁食,符合人类正常的昼夜生物钟,易对生物节律产生影响。例如对肥胖和超重人群进行为期4周的黎明至黄昏TRE禁食,该模式可上调自噬相关基因(例如LAMP2、LC3B和ATG5)的表达,同时改善代谢和炎症相关指标^[52]。另外,对老年人进行夜间14小时模式的TRE,不仅能够提升其认知功能,还能有效缓解失眠症状^[36]。而对于老年雌性小鼠,TRE通过适当延长禁食时间可以在延长寿命方面展现出更佳的效果^[46]。

FMD仅调整饮食结构,模拟进入禁食状态,可使机体在具有充足营养的状态下产生健康效应。例如,周期性FMD疗法对早期三阴性乳腺癌患者具有良好的疗效,并确认肿瘤内糖酵解早期变化可作为营养限制临床获益的有效预测指标^[53]。另外,为期3个月的周期性FMD饮食干预,可使正常或超重受试者胰岛素抵抗及其他糖尿病前期指标显著降低,肝脏脂肪含量减少,并表现出免疫系统年龄衰老延缓^[37]。

5:2 IF单次执行禁食的时间最长,对机体具有相对而言更强的代谢压力。在人类临床试验中,5:2 IF在减重方面的表现相较于传统健康饮食更为出色,这一效果可能与载脂蛋白E和SLC16A7基因型相关^[54]。另外,一项随机对照试验表明,5:2 IF方案还能通过激活肝脏PPAR α 和PCK1通路改善非酒精性脂肪性肝炎及相关纤维化进展,最终抑制肝癌发展^[55]。

ADF与TRE相比,在整日时间中均处于禁食的状态,可以触发更多机体应激而不形成过度的压力。例如,一项随机对照试验表明ADF能降低内脏脂肪量、静息代谢率、三碘甲状腺原氨酸及非高密度脂蛋白胆固醇水平,进而增加活动能量消耗并改善健康相关生活质量^[26]。另外,动物实验表明,ADF可诱导脂肪酸氧化,促进从头脂肪生成相关酶的表达,对肝脏代谢稳态进行重塑^[27]。

因此,现有研究已明确不同IF干预模式在特定人群(如肥胖超重者、老年人)和特定健康目标(如代谢改善、寿命延长、认知提升、疾病防治)中展现出差异化优势,且部分机制(如自噬基因调控、通路激活、基因型关联)得到初步阐释(表1),为IF在临床健康管理中的应用提供了关键证据支撑。

1.4 间歇性禁食健康效应解析存在的挑战

IF对机体代谢功能的调控具有多维度、跨层级特征,其效应贯穿宏观生理表型调控至微观分子机制调控的完整链条(图1)。IF不仅参与内分泌系统稳态维持及免疫功能的精准调控,还可通过靶向多条细胞信号转导通路,对物质代谢、能量代谢及细胞命运决定产生深远影响。尽管IF相关研究已取得阶段性进展,但该领域仍面临多重科学挑战:首先,当前不同研究采用的IF干预方案缺乏统一标准,在禁食时长、膳食营养构成、能量限制幅度及研究对象(物种、年龄、生理状态)等关键参数上存在显著差异,导致研究结果的横向可比性降低,难以形成一致性结论;其次,针对不同IF模式(如TRE、ADF)长期应用效果及安全性的纵向研究相对匮乏,对其长期实施可能引发的潜在健康风险(如营养缺乏、代谢适应性紊乱等)仍缺乏系统认知;此外,IF介导的代谢调控涉及复杂的通路网络与多维度交互效应,其产生的海量数据(如不同人群、不同饮食模式下多指标的动态变化及机制关联)难以通过传统人工分析方法实现深度整合与系统解析。因此,具备海量信息

表1 间歇性禁食主要模式及其对健康效应的影响

Table 1 Primary intermittent fasting regimens and their effects on health

饮食类型	基本特点	健康效应
FMD (禁食模拟饮食)	(1)低热量低蛋白低碳,高不饱和脂肪,每月1~2次 (2)旨在“诱骗”身体进入禁食状态	(1)可减轻普通人群体重且增加瘦体重比例,还可降低衰老、糖尿病、心血管疾病及癌症的风险因子/生物标志物,且无重大不良反应 ^[11] (2)对于1型糖尿病患者,可通过促进胰腺细胞重编程,恢复胰岛素生成能力 ^[56] (3)对早期癌症患者具有良好的疗效 ^[53] (4)可减轻正常成年人的胰岛素抵抗及显著降低其他糖尿病前期指标、肝脏脂肪含量,表现出免疫系统年龄衰老延缓 ^[37]
TRE (时间限制进食)	(1)每日进食窗口限制在4~12 h (2)主要关注进食时间 (3)适合规律作息人群	(1)短期即可使肥胖人群体重减轻 ^[12] (2)通过调控生物钟基因,同步线粒体代谢节律,增强昼夜节律调节 ^[49,57] (3)改善斋戒且肥胖人群的代谢和炎症相关指标,并且上调自噬相关基因的表达 ^[52] (4)改善健康人群的心血管代谢健康状况,且对肠道吸收代谢影响较小 ^[58] (5)改善2型糖尿病患者的糖化血红蛋白(HbA1c)和胰岛素敏感性,进而改善糖尿病患者的生活质量 ^[59] (6)有效降低代谢功能障碍相关脂肪性肝病患者的体重、腰围和体脂量,减轻脂肪变性,改善葡萄糖稳态及睡眠质量 ^[60]
5:2 IF (5:2禁食法)	(1)每周5天正常饮食,2天极低热量摄入 (2)非连续禁食,禁食日可分散或连续	(1)短期内可改善糖尿病患者的血糖指标并减轻体重 ^[48] (2)对于超重且存在胰岛素抵抗的成年人,可通过调节APOE减轻体重、降低神经元胰岛素抵抗、减缓大脑衰老速度,并改善执行功能和记忆力 ^[54] (3)通过激活肝脏PPAR α 和PCK1通路改善非酒精性脂肪性肝炎及相关纤维化进展 ^[55] (4)通过改善血糖控制、脂肪沉积、肝脏脂肪变性及心血管等代谢指标,减缓2型糖尿病患者慢病的发生发展 ^[61]
ADF (隔日禁食)	(1)每隔一天禁食或摄入极低热量,非禁食日正常进食 (2)严格周期性禁食	(1)短期内可使超重人群体重减轻 ^[14] (2)通过恢复肾素-血管紧张素调节以及上调 α -klotho蛋白的表达有效降低血压 ^[47] (3)通过诱导脂肪酸氧化以及从头脂肪生成相关酶的表达对肝脏代谢稳态进行重塑 ^[27] (4)结合胰岛素精细管理,可以提高apoM水平,进而调节2型糖尿病患者的胆固醇代谢能力 ^[62] (5)通过影响肠干细胞的线粒体代谢,促进肠干细胞数量与再生能力的恢复,从而对小肠产生显著的抗衰老效应 ^[63] (6)通过降低内脏脂肪量、静息代谢率及非高密度脂蛋白胆固醇水平,进而增加活动能量消耗并改善健康相关生活质量 ^[26]

注:本表汇总了间歇性禁食目前的主要执行模式的特点及其所具有的部分健康效应,对比了不同禁食方案之间的健康效应差别以及执行方式的差异。

Note: This table summarizes the characteristics of intermittent fasting’s primary implementation models and some of their associated health effects, comparing the differences in health outcomes between various fasting protocols and variations in implementation methods.

整合、复杂网络分析及高效数据挖掘能力的AI技术,恰好为破解上述研究瓶颈、深入阐释IF的健康调控机制提供了关键技术支撑,同时为不同健康需求人群个性化IF方案的选择提供指导意见。

2 人工智能技术在间歇性禁食研究中的(潜在)转化应用

2.1 辅助诊断以及个性化评估健康效应

在慢性病发生以前以及疾病发展早期,健康的饮食方式是重要的干预手段^[6,64],并且有研究表明IF对于大多数慢性病也具有防治作用^[65],这为后续

IF的临床应用提供了基本依据。然而,如何实现对疾病病程的精准识别与动态评估,成为制定个体化膳食干预方案的关键环节。传统上,疾病诊断主要依赖对病史、体格检查结果、影像学检查及实验室检测结果等多模态信息的解读,而AI可通过识别多维复杂信号中的表型变异和风险来源进行量化诊断。随着机器学习(machine learning, ML)、深度学习(deep learning, DL)模型的进步,AI算法已能够处理大规模、非结构化的生理信号与医学影像数据,从中挖掘出超越人工经验的新诊断特征,并逐渐成为慢性病智能诊断的重要方向。

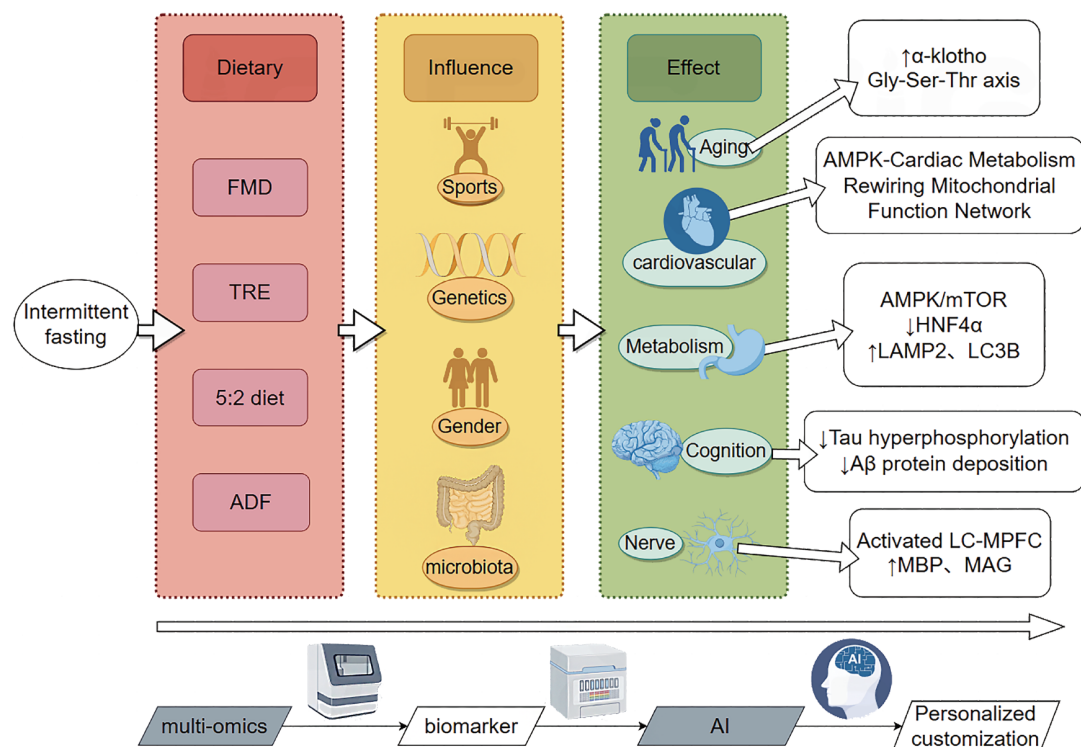


图1 间歇性禁食结合人工智能分析摘要

不同间歇性禁食(intermittent fasting, IF)方案结合多种影响因素,会形成更为庞大的关联通路与机制网络。既往研究积累的多组学数据,为人工智能深度解析间歇性禁食的健康效应提供了充足支撑,也为进一步构建个性化禁食方案的机器学习模型奠定了基础。

Figure 1 Abstract of intermittent fasting combined with artificial intelligence analysis

Different intermittent fasting (IF) protocols combined with diverse influencing factors generate an expanded network of associated pathways and mechanisms. Multi-omics data accumulated from previous studies provide sufficient support for artificial intelligence-driven in-depth analysis of IF's health effects, laying the foundation for the further development of machine learning models tailored to personalized fasting regimens.

在实际应用中, AI拓展了疾病的动态诊断功能, 同时为非侵入性诊断提供了技术基础。并且在大数据的加持下, 数字病理结合AI技术能够在传统病理难以识别的阶段, 注意到以往被忽略的诊断特征^[66]。例如AI算法已通过分析电子健康记录(electronic health records, EHR)数据, 实现对动脉粥样硬化的量化评估与死亡风险谱绘制, 并识别传统诊断遗漏的高危个体^[67]。此外, 基于AI技术开发的智能分析设备目前已被成功开发, 通过利用声学参数^[68]、下颌运动^[69]以及咀嚼和进食的视觉图像^[70], 完成患者营养摄入量的精准测算与饮食行为信息的系统采集, 并将相关量化数据同步提供给营养师等接受过规范化培训的临床营养专业人员, 实现患者营养状况的高精准度辅助评估。与此同时, 深度学习模型可进一步对社区内进行IF干预的患者定期进行评估, 如患者发生不良反应时营养师能及

时发现并终止干预^[71]。

AI诊断技术可辅助识别疾病发生发展的关键节点, 为IF干预的时机选择与方案制定提供科学依据, 从而助力IF在疾病干预中发挥最优效能。例如, 通过设计AI整合健康人群的大规模数据集, 发现不同个体对相同食物的血糖反应存在差异, 表明控制和降低血糖水平的饮食方案需进行个体化调整^[72]。此外, 一种基于机器学习开发的预测模型, 可准确预测再喂养综合征风险, 从而实现对患者的及时干预^[70]。以上诸多研究结果均表明, AI对病程的早期诊断和动态分析可以适时地将IF纳入疾病治疗方案中, 进而发挥IF的健康效能, 且避免IF的不良作用。

2.2 多组学数据整合与代谢相关生物标志物挖掘

AI技术不仅在协助多组学数据整合与生物系统通路解析中展现出显著优势, 还在代谢相关生物标志物的发现、验证与功能解析中发挥着不可替代的

关键作用。例如,联合放射组学和病理组学数据建立的DL模型,已被广泛用于免疫治疗相关疗效预测生物标志物的筛选与验证^[73-75]。此外,基于大规模基因组学和蛋白质组学数据集训练的AI系统,在疾病相关生物标志物的识别与功能解析中也表现出更高的准确性与稳定性^[76-79]。这类技术体系为AI技术解析IF的复杂调控网络、挖掘其核心代谢相关生物标志物提供了重要的方法学参考与广阔的应用空间。

IF作用机制相关研究涉及海量多维的多组学数据,这一特点对高效、精准的大数据分析技术提出了迫切需求,也推动AI深度融入IF领域的基础研究与临床转化探索。目前,AI技术已可通过整合分析多组学数据,实现对代谢性疾病患者的长期监测与管理,例如在连续血糖监测(continuous glucose monitoring, CGM)模式中,AI能够整合处理CGM、基因组、代谢组及微生物组的多维数据,为进行过腹膜透析(peritoneal dialysis, PD)的糖尿病患者提供个性化的饮食、用药及透析方案建议,并且AI通过解析数据、优化治疗策略及强化患者健康教育,为临床工作提供了有力辅助^[80]。此外,AI技术在多组学数据整合分析中的应用亦已延伸至IF研究领域,如基于DL模型的研究证实,长期IF可重塑AMPK/mTOR信号轴等心脏能量代谢通路,并优化线粒体功能,从而显著增强小鼠心脏细胞功能^[30]。以上研究结果均表明,AI技术的多维技术探索路径是持续挖掘IF健康效应的核心驱动力,其在解析IF诱发的多维且复杂的调节机制中具有不可替代的关键价值。

目前,AI技术也应用于IF健康效应相关生物标志物的挖掘。例如,DL技术可通过整合遗传与代谢组学数据精准识别阿尔茨海默病高风险亚组,并揭示出脑源性神经营养因子信号通路的增强是禁食干预逆转认知功能障碍的分子机制之一^[50]。另有研究团队通过ML算法解析饮食摄入数据与神经功能指标的相关性,筛选出影响神经系统疾病发生发展的关键饮食因子,构建了神经疾病发病风险预测模型,可辅助神经系统疾病患者的个性化饮食方案优化。此外,在评估饮食方案的应用中,研究人员采用XGBoost机器学习模型结合数据库匹配方法,可以在24小时膳食回顾的应用背景下,对特定膳食评估工具未直接输出的营养素进行补充估算,探索传统饮食评估工具忽略的营养素,为膳食摄入的全面评

估提供了新的技术方向^[82]。目前来看,IF干预涉及海量通路以及指数级增长的生物标志物,与AI技术的大数据分析方式非常吻合,借助AI对IF进行数据分析拥有巨大潜力。

2.3 临床精准干预与个性化应用

在IF个性化模式探索中,AI在干预模式、精准化方案制定等多个核心环节展现出重要应用价值。例如,在糖尿病管理过程中,2型糖尿病饮食决策支持系统(ontology-based type-2 diabetes decision support system, OnT2D-DSS)可以系统整合专家知识,为患者提供便捷且个性化的饮食建议^[83]。为满足住院患者的营养评估需求,基于AI开发的营养摄入量估算系统可通过RGB-D图像完成食物图像分割,精准识别不同食物组分并估算摄入量,并计算宏量营养素摄入量,其估算误差仅为15%^[84],且与临床营养专家估算结果的一致性显著优于传统标准临床评估流程^[85]。这些应用通过提供更加准确、自动化的营养摄入评估,为应对医院环境中的营养不良风险提供了解决方案。在干预模式评估方面,一项减重干预的研究显示,基于ML构建的模型可精准预测受试者的饮食依从性偏差,不仅为增强人群膳食指南依从性、实现饮食行为实时干预提供了技术可能,也为整合个体水平与群体水平多维度数据、优化模型预测效能提供了全新的研究视角^[86]。

多种不同形式的IF新方案以及联合健康生活方式的研究也在不断为个性化IF方案提供新的方向。在已有AI与IF结合的研究中,ML模型曾被用于分析限时进食对昼夜节律的调控作用^[87]。而更多个性化的禁食方案均具有可开发的潜力,例如16:8轻禁食方案可通过调节人体CD4⁺ Treg细胞及增加 *Akkermansia muciniphila* 丰度,改善免疫衰老并促进肠道菌群健康化^[88]。一项为期12个月的随机对照试验发现,4:3禁食策略可以更显著地改善超重或肥胖成年人的体重^[89]。此外,一项系统综述纳入12项研究,比较IF联合运动与单独IF的健康效应,发现联合干预在减脂、改善糖脂代谢和心肺功能上效果更优^[31],提示进一步探究禁食时长与个体健康状况对干预效果的影响,对推动个性化方案临床转化具有重要意义。综上所述,基于AI技术整合的多维度个体数据(疾病进展、生活习惯及健康状况),可辅助制定精准化的禁食干预策略,提升IF干预的安全性与有效性。

2.4 跨学科合作与人机交互发展

对机体健康情况的实时动态监测,是调整饮食计划的重要因素之一。IF的核心特征在于禁食窗口期不摄入食物或仅摄入极低热量食物,因此对食物选择以及摄入量精准判断的要求极高。同时,IF存在多种干预模式,不同模式下禁食时长调整与不同个体执行方案差异的把控,对医患双方获取精准、连续的动态监测数据提出了极高要求,而AI显著提升了医疗技术的可及性与精准性,在医务人员的指导下,可以协助非专业人士更加便捷地评估自己的健康状态以做出饮食计划的调整。研究表明,卷积神经网络(convolutional neural networks,CNN)基于图像的食物能量自动估算技术,结合真实世界第一人称视角图像采集,在食物存在性检测中已经可实现较高的准确率^[90,91]。完成图像中的食物初筛识别后,需进一步对食物品类进行精细化分类与定性分析,目前常用技术手段包括支持向量机(support vector machine,SVM)、生成对抗网络(generative adversarial network,GAN)、优化型CNN等深度学习模型。例如,基于机器学习的GoCARB系统利用计算机视觉技术,通过识别智能手机图像中的不同食物来估算碳水化合物含量^[92],对于非营养专业人士识别禁食周期中的食物选择具有极大的辅助作用。未来研究应进一步强化多学科协同与人机协同创新机制,以开放、规范、可信为导向不断推动人机协同发展:跨学科合作将成为IF研究深化与临床应用落地的核心动力,而AI技术的伦理治理与安全框架建设,则是实现个体化健康干预可持续发展的重要保障。

3 机遇与挑战

AI技术整合多源健康数据与开发预测模型的技术优势,为构建精准化个体化营养干预体系提供了关键技术支撑。首先,基于AI开发的膳食方案制定模型可以通过多组学、动态生理、临床表型、饮食行为等多源数据,构建针对不同需求的预测模型,进而实现个体化精准适配;其次,AI可联合穿戴设备、智能膳食评估终端实现实时动态监测,协助专业人士解读复杂数据,弥补传统静态指导的短板;再次,通过普及民用AI工具,可推动精准营养服务从医院向社区、家庭场景延伸;最后,有效膳食干预可降低慢病发病与并发症风险,减少相关医疗支出。

IF作为当前精准营养与慢病防控领域极具应用潜力的膳食干预模式,是上述AI技术的核心应用场景之一,然而针对IF的研究仍面临三重瓶颈。其一,数据异质性问题,如热量限制强度不一以及表观遗传与环境暴露间的复杂交互作用,限制了结果的可重复性;其二,技术层面局限,现有AI模型对多组学数据的层级特征提取效率低,可解释性评分低于临床适用阈值,难以支持临床决策;其三,临床转化困难,长期追踪数据严重匮乏,超过5年的前瞻性队列仅占12%,阻碍了对IF长期效应的可靠评估。

上述IF领域的固有瓶颈,与AI技术自身的应用局限结合,共同构成了AI赋能IF精准化、规范化发展的核心挑战。IF标准化、长期研究数据的缺乏以及质量偏倚的问题,会制约AI模型外推能力,进而导致复杂深度学习模型可解释性差,可能无法满足临床决策可溯源性的要求;IF涉及的广泛代谢变化与其中混杂产生的干扰,使得短期实验或临床试验获得的数据难以构建出能够捕捉长期代谢动态变化的AI模型,使模型的长期适用性受限;此外,AI本身相关行业标准、监管框架、风险防控与责任界定机制尚不健全,特殊人群应用的安全边界未明确,种种数据安全也会限制AI个性化制定IF饮食方案的规范化推广。

4 总结与展望

当前,世界范围内NCDs的研究发展愈发深入,各种疾病的相关因素愈发复杂,对精准医学发展的要求愈发紧迫。AI技术凭借强大的数据整合与深度分析能力,已逐渐成为推动精准营养与健康领域发展的关键力量。饮食方式干预是个性化慢病防治的重要手段,其中IF作为新兴的饮食方式之一,越来越受到关注与研究。通过深度融合多维度健康数据、性别差异及禁食时间等关键变量,AI有望构建更精准、高效的个体化IF干预方案,为慢性病防控与公众健康促进提供新策略。

面对机遇与挑战,未来应着力构建三支柱体系。首先,建立遵循FAIR原则的组学数据库,以解决数据异质性问题为核心目标,通过遵循可发现(findable)、可访问(accessible)、可互操作(interoperable)和可重用(reusable)的FAIR原则,支持高质量数据共享与整合;其次,构建融合迁移学习与知识图谱的智能分析框架,提升多组学特征提取效率与模型可解释性,

增强AI在临床实践中的可用性与透明度,满足临床应用的需求;最后,开展营养学-临床医学深度融合的精准干预试验,系统积累长期效应数据,实现从机制研究到个体化应用的闭环转化。如开展大规模的深度表型前瞻性队列研究,通过涵盖纵向特征分析和多组学数据分析,结合健康人群匹配和多因素分层进行数据汇总,识别具有诊断、预后和治疗价值的新型分子标志物,随后完成数据库构建并开发多模态的AI模型。通过收集饮食和连续血糖监测等数据进行自监督学习训练,为饮食模式健康效应识别及相关疾病发生发展的预测提供实际案例参考^[93]。

与此同时,要注意AI数据分析会给公众信息安全带来多重风险,尤其是分析连续收集的健康数据(如可穿戴设备数据)时产生的隐私问题不容忽视,应当构建更具针对性的隐私保护框架。首先,进行流转链条压缩,减少患者信息与数据最终使用端的中间节点,降低数据泄露风险;同时,以区块链实现数据使用全链路可追溯,保证数据泄露责任方的可追溯性;最后,建立场景化权限体系与全链路数据遗忘机制,进行精细化授权,退出后彻底清除相关数据,杜绝患者信息重复使用。

因此,未来IF研究应聚焦于开发高效的跨组学整合分析平台,致力于提升模型泛化能力,打破数据壁垒,深化机制解析与干预策略优化。同时,应加强跨学科协作,整合营养学、生物信息学与临床医学优势,推动IF干预的精准化设计与临床转化,最终服务于人类健康。

致谢 感谢林闽奎、黄焱秋、徐亚丹和顾问在本综述文献收集、初稿撰写、表格整理及机制示意图制作方面做出的重要贡献。

参考文献

- [1] Naghavi M, Kyu HH, A B, et al. Global burden of 292 causes of death in 204 countries and territories and 660 subnational locations, 1990–2023: A systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2023. *Lancet*, 2025, 406: 1811–72.
- [2] World Health Organization. Noncommunicable diseases [EB/OL]. (2025-09-25). <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/noncommunicable-diseases>.
- [3] Liu H, Yin P, Qi J, et al. Burden of non-communicable diseases in China and its provinces, 1990–2021: Results from the Global Burden of Disease Study 2021. *Chin Med J (Engl)*, 2024, 137: 2325–33.
- [4] Lv J, Zhang ZF. Progress and challenges in NCD prevention and control in China. *BMJ*, 2024, 387: q2098.
- [5] Duan H, Pan J, Guo M, et al. Dietary strategies with anti-aging potential: Dietary patterns and supplements. *Food Res Int*, 2022, 158: 111501.
- [6] Shang X, Liu J, Zhu Z, et al. Healthy dietary patterns and the risk of individual chronic diseases in community-dwelling adults. *Nat Commun*, 2023, 14: 6704.
- [7] Tessier AJ, Wang F, Korat AA, et al. Optimal dietary patterns for healthy aging. *Nat Med*, 2025, 31: 1644–52.
- [8] Varady KA, Cienfuegos S, Ezpeleta M, et al. Clinical application of intermittent fasting for weight loss: progress and future directions. *Nat Rev Endocrinol*, 2022, 18: 309–21.
- [9] Fanti M, Mishra A, Longo VD, et al. Time-restricted eating, intermittent fasting, and fasting-mimicking diets in weight loss. *Curr Obes Rep*, 2021, 10: 70–80.
- [10] Careajal V, Marín A, Gihardo D, et al. Intermittent fasting and human metabolic health. *Rev Med Chil*, 2023, 151: 81–100.
- [11] Brandhorst S, Choi In Y, Wei M, et al. A periodic diet that mimics fasting promotes multi-system regeneration, enhanced cognitive performance, and healthspan. *Cell Metab*, 2015, 22: 86–99.
- [12] Gill S, Panda S. A smartphone app reveals erratic diurnal eating patterns in humans that can be modulated for health benefits. *Cell Metab*, 2015, 22: 789–98.
- [13] Fitzgerald KC, Vizthum D, Henry-Barron B, et al. Effect of intermittent vs. daily calorie restriction on changes in weight and patient-reported outcomes in people with multiple sclerosis. *Mult Scler Relat Disord*, 2018, 23: 33–9.
- [14] Trepanowski JF, Kroeger CM, Barnosky A, et al. Effect of alternate-day fasting on weight loss, weight maintenance, and cardioprotection among metabolically healthy obese adults. *JAMA Intern Med*, 2017, 177: 930.
- [15] Madeo F, Carmona-Gutierrez D, Hofer SJ, et al. Caloric restriction mimetics against age-associated disease: Targets, mechanisms, and therapeutic potential. *Cell Metab*, 2019, 29: 592–610.
- [16] Panteli D, Adib K, Buttigieg S, et al. Artificial intelligence in public health: Promises, challenges, and an agenda for policy makers and public health institutions. *Lancet Public Health*, 2025, 10: e428–32.
- [17] Xue ZR, Xin YY, Jin WL. Exploiting metabolic

- vulnerabilities in cancer: From mechanisms to therapeutic opportunities. *Cancer Lett*, 2025, 634: 218067.
- [18] Smeland OB, Busch C, Andreassen OA, et al. Novel multimodal precision medicine approaches and the relevance of developmental trajectories in bipolar disorder. *Biol Psychiatry*, 2025, 98: 343–53.
- [19] Nishijima S, Stankevic E, Aasmets O, et al. Fecal microbial load is a major determinant of gut microbiome variation and a confounder for disease associations. *Cell*, 2025, 188: 222–36.e15.
- [20] Wang T, Holscher HD, Maslov S, et al. Predicting metabolite response to dietary intervention using deep learning. *Nat Commun*, 2025, 16: 815.
- [21] Cifuentes L, Anazco D, O'Connor T, et al. Genetic and physiological insights into satiation variability predict responses to obesity treatment. *Cell Metab*, 2025, 37: 1655–66.e5.
- [22] Patikorn C, Roubal K, Veettil SK, et al. Intermittent fasting and obesity-related health outcomes: An umbrella review of meta-analyses of randomized clinical trials. *JAMA Netw Open*, 2021, 4: e2139558.
- [23] Mohamed YA, Abouelmagd M, Elbialy A, et al. Effect of intermittent fasting on lipid biokinetics in obese and overweight patients with type 2 diabetes mellitus: Prospective observational study. *Diabetol Metab Syndr*, 2024, 16: 4.
- [24] Haran A, Bergel M, Kleiman D, et al. A multiomics comparison of weight loss interventions shows the distinct effects of bariatric surgery and intermittent fasting on hepatic metabolism. *bioRxiv*, 2022, <https://doi.org/10.1101/2022.06.13.495926>.
- [25] Patel S, Yan Z, Remedi MS. Intermittent fasting protects β -cell identity and function in a type-2 diabetes model. *Metabolism*, 2024, 153: 155813.
- [26] Derron N, Güntner AT, Weber IC, et al. Alternate-day fasting elicits larger changes in fat mass than time-restricted eating in adults without obesity – A randomized clinical trial. *Clin Nutr*, 2025, 53: 212–21.
- [27] Hatchwell L, Harney DJ, Cielesh M, et al. Multi-omics analysis of the intermittent fasting response in mice identifies an unexpected role for HNF4 α . *Cell Rep*, 2020, 30: 3566–82.e4.
- [28] Wang W, Dai M, Ma HM. A randomized controlled study on intermittent fasting improving glucose and lipid metabolism and body weight in overweight/obese patients with type 2 diabetes mellitus. *Intern Med*, 2025, 20: 260–4.
- [29] Shi H, Zhang B, Abo-Hamzy T, et al. Restructuring the gut microbiota by intermittent fasting lowers blood pressure. *Circ Res*, 2021, 128: 1240–54.
- [30] Alli-Shaik A, Arumugam TV, Liehn EA, et al. Multiomics analyses reveal dynamic bioenergetic pathways and functional remodeling of the heart during intermittent fasting. *Elife*, 2023, 12: RP89214.
- [31] Dai ZH, Wan KW, Wong PS, et al. Additional effect of exercise to intermittent fasting on body composition and cardiometabolic health in adults with overweight/obesity: A systematic review and meta-analysis. *Curr Obes Rep*, 2025, 14: 54.
- [32] Han SL, Li Z, Han Yu. Effect of intermittent fasting on correction of blood lipids, liver function and body weight in patients with non-alcoholic fatty liver disease. *Henan Med Res*, 2024, 33: 2370–3.
- [33] Jia M, Shi L, Zhao Y, et al. Intermittent fasting mitigates cognitive deficits in Alzheimer's disease via the gut-brain axis. *bioRxiv*, 2022, <https://doi.org/10.1101/2022.05.11.491466>.
- [34] Perez-Kast RC, Camacho-Morales A. Fasting the brain for mental health. *J Psychiatr Res*, 2025, 181: 215–24.
- [35] de Cabo R, Longo DL, Mattson MP. Effects of intermittent fasting on health, aging, and disease. *N Engl J Med*, 2019, 381: 2541–51.
- [36] James DL, Larkey LK, Maxfield M, et al. Prolonged nightly fasting in older adults with memory decline: A single-group pilot study exploring changes in cognitive function and cardiometabolic risk factors. *J Clin Transl Sci*, 2024, 9: e1.
- [37] Brandhorst S, Levine ME, Wei M, et al. Fasting-mimicking diet causes hepatic and blood markers changes indicating reduced biological age and disease risk. *Nat Commun*, 2024, 15: 1309.
- [38] Janssen H, Kahles F, Liu D, et al. Monocytes re-enter the bone marrow during fasting and alter the host response to infection. *Immunity*, 2023, 56: 783–96.e7.
- [39] Sebastian SA, Shah Y, Arsene C. Intermittent fasting and cardiovascular disease: A scoping review of the evidence. *Dis Mon*, 2024, 70: 101778.
- [40] Gudden J, Arias Vasquez A, Bloemendaal M. The effects of intermittent fasting on brain and cognitive function. *Nutrients*, 2021, 13: 3166.
- [41] Fu R, Zhang P, Zhang JW, et al. Intermittent fasting exacerbates colon inflammation by promoting Th17 cell differentiation through inhibition of gut microbiota-derived indoleacrylic acid. *World J Gastroenterol*, 2025, 31: 108815.
- [42] Matta L, Weber P, Erener S, et al. Chronic intermittent fasting impairs β cell maturation and function in

- adolescent mice. *Cell Rep*, 2025, 44: 115225.
- [43] Deng Y, Yang X, Ye X, et al. Alternate day fasting aggravates atherosclerosis through the suppression of hepatic ATF3 in *ApoE*^{-/-} mice. *Life Metab*, 2024, 3: 10ae009.
- [44] Chen H, Liu C, Cui S, et al. Intermittent fasting triggers interorgan communication to suppress hair follicle regeneration. *Cell*, 2025, 188: 157–74.e22.
- [45] Qian YX, Rao SS, Tan YJ, et al. Intermittent fasting targets osteocyte neuropeptide Y to relieve osteoarthritis. *Adv Sci*, 2024, 11: e2400196.
- [46] Duregon E, Fernandez ME, Martinez Romero J, et al. Prolonged fasting times reap greater geroprotective effects when combined with caloric restriction in adult female mice. *Cell Metab*, 2023, 35: 1179–94.e5.
- [47] Badreh F, Joukar S, Badavi M, et al. Fasting recovers age-related hypertension in the rats: reset of renal renin-angiotensin system components and klotho. *BMC Nephrol*, 2024, 25: 470.
- [48] Guo L, Xi Y, Jin W, et al. A 5:2 intermittent fasting meal replacement diet and glycemic control for adults with diabetes. *JAMA Netw Open*, 2024, 7: e2416786.
- [49] Xin H, Huang R, Zhou M, et al. Daytime-restricted feeding enhances running endurance without prior exercise in mice. *Nat Metab*, 2023, 5: 1236–51.
- [50] Ripa R, Ballhysa E, Steiner JD, et al. Refeeding-associated AMPK γ 1 complex activity is a hallmark of health and longevity. *Nat Aging*, 2023, 3: 1544–60.
- [51] Eraky SM, Ramadan NM, Atif HM, et al. The ameliorating effect of intermittent fasting on intestinal glucagon-like peptide 1 in rats fed a high-fat diet via the farnesoid X receptor and the melanocortin-4 receptor. *Life Sci*, 2025, 361: 123327.
- [52] Bou Malhab LJ, Madkour MI, Abdelrahim DN, et al. Dawn-to-dusk intermittent fasting is associated with overexpression of autophagy genes: A prospective study on overweight and obese cohort. *Clin Nutr ESPEN*, 2025, 65: 209–17.
- [53] Ligorio F, Vingiani A, Torelli T, et al. Early downmodulation of tumor glycolysis predicts response to fasting-mimicking diet in triple-negative breast cancer patients. *Cell Metab*, 2025, 37: 330–44.e7.
- [54] Kapogiannis D, Manolopoulos A, Mullins R, et al. Brain responses to intermittent fasting and the healthy living diet in older adults. *Cell Metab*, 2024, 36: 1668–78.e5.
- [55] Gallage S, Ali A, Barragan Avila JE, et al. A 5:2 intermittent fasting regimen ameliorates NASH and fibrosis and blunts HCC development via hepatic PPAR α and PCK1. *Cell Metab*, 2024, 36: 1371–93.e7.
- [56] Cheng CW, Villani V, Buono R, et al. Fasting-mimicking diet promotes Ngn3-driven β -cell regeneration to reverse diabetes. *Cell*, 2017, 168: 775–88.e12.
- [57] Whittaker DS, Akhmetova L, Carlin D, et al. Circadian modulation by time-restricted feeding rescues brain pathology and improves memory in mouse models of Alzheimer's disease. *Cell Metab*, 2023, 35: 1704–21.e6.
- [58] Dawson MA, Cheung SN, La Frano MR, et al. Early time-restricted eating improves markers of cardiometabolic health but has no impact on intestinal nutrient absorption in healthy adults. *Cell Rep Med*, 2024, 5: 101363.
- [59] Teong XT, Liu K, Vincent AD, et al. Intermittent fasting plus early time-restricted eating versus calorie restriction and standard care in adults at risk of type 2 diabetes: A randomized controlled trial. *Nat Med*, 2023, 29: 963–72.
- [60] Oh JH, Yoon EL, Park H, et al. Efficacy and safety of time-restricted eating in metabolic dysfunction-associated steatotic liver disease. *J Hepatol*, 2025: 1256–65.
- [61] Li M, Li J, Xu Y, et al. Effect of 5:2 regimens: Energy-restricted diet or low-volume high-intensity interval training combined with resistance exercise on glycemic control and cardiometabolic health in adults with overweight/obesity and type 2 diabetes: A three-arm randomized controlled trial. *Diabetes Care*, 2024, 47: 1074–83.
- [62] Pammer A, Obermayer A, Stadler JT, et al. Effects of dietary interventions and intermittent fasting on HDL function in obese individuals with T2DM: A randomized controlled trial. *Cardiovasc Diabetol*, 2024, 23: 339.
- [63] Quan H, Lu Y, Lin Y, et al. Alternate day fasting enhances intestinal epithelial function during aging by regulating mitochondrial metabolism. *Aging Cell*, 2025, 24: e70052.
- [64] Hu FB. Diet strategies for promoting healthy aging and longevity: An epidemiological perspective. *J Intern Med*, 2023, 295: 508–31.
- [65] Longo VD, Di Tano M, Mattson MP, et al. Intermittent and periodic fasting, longevity and disease. *Nat Aging*, 2021, 1: 47–59.
- [66] Naoumov NV, Brees D, Loeffler J, et al. Digital pathology with artificial intelligence analyses provides greater insights into treatment-induced fibrosis regression in NASH. *J Hepatol*, 2022, 77: 1399–409.
- [67] Forrest IS, Petrazzini BO, Duffy Á, et al. Machine learning-based marker for coronary artery disease: Derivation and validation in two longitudinal cohorts. *Lancet*, 2023, 401: 215–25.
- [68] Amft O, Kusserow M, Troster G. Bite weight prediction

- from acoustic recognition of chewing. *IEEE Trans Biomed Eng*, 2009, 56: 1663–72.
- [69] Vu T, Lin F, Alshurafa N, et al. Wearable food intake monitoring technologies: A comprehensive review. *Computers*, 2017, 6: 4.
- [70] Choi TY, Chang MY, Heo S, et al. Explainable machine learning model to predict refeeding hypophosphatemia. *Clin Nutr ESPEN*, 2021, 45: 213–9.
- [71] Ren SS, Zhu MW, Zhang KW, et al. Machine learning-based prediction of in-hospital complications in elderly patients using GLIM-, SGA-, and ESPEN 2015-diagnosed malnutrition as a factor. *Nutrients*, 2022, 14: 3035.
- [72] Zeevi D, Korem T, Zmora N, et al. Personalized nutrition by prediction of glycemic responses. *Cell*, 2015, 163: 1079–94.
- [73] He B, Dong D, She Y, et al. Predicting response to immunotherapy in advanced non-small-cell lung cancer using tumor mutational burden radiomic biomarker. *J Immunother Cancer*, 2020, 8: e000550.
- [74] Bao X, Shi R, Zhao T, et al. Immune landscape and a novel immunotherapy-related gene signature associated with clinical outcome in early-stage lung adenocarcinoma. *J Mol Med (Berl)*, 2020, 98: 805–18.
- [75] Johannet P, Coudray N, Donnelly DM, et al. Using machine learning algorithms to predict immunotherapy response in patients with advanced melanoma. *Clin Cancer Res*, 2021, 27: 131–40.
- [76] Mann M, Kumar C, Zeng WF, et al. Artificial intelligence for proteomics and biomarker discovery. *Cell Syst*, 2021, 12: 759–70.
- [77] Javaid M, Haleem A, Pratap Singh R, et al. Significance of machine learning in healthcare: Features, pillars and applications. *Int J Intell Networks*, 2022, 3: 58–73.
- [78] McLeish E, Slater N, Mastaglia FL, et al. From data to diagnosis: how machine learning is revolutionizing biomarker discovery in idiopathic inflammatory myopathies. *Brief Bioinform*, 2024, 25: bbad514.
- [79] Peng J, Jury EC, Dönnies P, et al. Machine learning techniques for personalised medicine approaches in immune-mediated chronic inflammatory diseases: Applications and challenges. *Front Pharmacol*, 2021, 12: 720694.
- [80] Mahdavi S, Anthony NM, Sikaneta T, et al. Perspective: Multiomics and artificial intelligence for personalized nutritional management of diabetes in patients undergoing peritoneal dialysis. *Adv Nutr*, 2025, 16: 100378.
- [81] Gupta R, Kumari S, Senapati A, et al. New era of artificial intelligence and machine learning-based detection, diagnosis, and therapeutics in Parkinson's disease. *Ageing Res Rev*, 2023, 90: 102013.
- [82] Chin EL, Simmons G, Bouzid YY, et al. Nutrient estimation from 24-hour food recalls using machine learning and database mapping: A case study with lactose. *Nutrients*, 2019, 11: 3045.
- [83] Spoladore D, Stella F, Tosi M, et al. A knowledge-based decision support system to support family doctors in personalizing type-2 diabetes mellitus medical nutrition therapy. *Comput Biol Med*, 2024, 180: 109001.
- [84] Lu Y, Stathopoulou T, Vasiloglou MF, et al. An artificial intelligence-based system for nutrient intake assessment of hospitalised patients. *Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc*, 2019, 2019: 5696–9.
- [85] Papathanail I, Brühlmann J, Vasiloglou MF, et al. Evaluation of a novel artificial intelligence system to monitor and assess energy and macronutrient intake in hospitalised older patients. *Nutrients*, 2021, 13: 4539.
- [86] Goldstein SP, Zhang F, Thomas JG, et al. Application of machine learning to predict dietary lapses during weight loss. *J Diabetes Sci Technol*, 2018, 12: 1045–52.
- [87] Huang R, Chen J, Zhou M, et al. Multi-omics profiling reveals rhythmic liver function shaped by meal timing. *Nat Commun*, 2023, 14: 6086.
- [88] Chen Y, Li X, Yang M, et al. Time-restricted eating reveals a “younger” immune system and reshapes the intestinal microbiome in human. *Redox Biol*, 2024, 78: 103422.
- [89] Catenacci VA, Ostendorf DM, Pan Z, et al. The effect of 4:3 intermittent fasting on weight loss at 12 months. *Ann Intern Med*, 2025, 178: 634–44.
- [90] Fang S, Shao Z, Kerr DA, et al. An end-to-end image-based automatic food energy estimation technique based on learned energy distribution images: Protocol and methodology. *Nutrients*, 2019, 11: 877.
- [91] Heremans ERM, Chen AS, Wang X, et al. Artificial neural network-based automatic detection of food intake for neuromodulation in treating obesity and diabetes. *Obes Surg*, 2020, 30: 2547–57.
- [92] Siy Van VT, Antonio VA, Siguin CP, et al. Predicting undernutrition among elementary schoolchildren in the Philippines using machine learning algorithms. *Nutrition*, 2022, 96: 111571.
- [93] Reicher L, Shilo S, Godneva A, et al. Deep phenotyping of health-disease continuum in the Human Phenotype Project. *Nat Med*, 2025, 31: 3191–203.