

编者按:人工智能技术在医疗领域的应用渗透正在加速,应用场景日渐丰富,为医生在临床疾病诊断、治疗和预后监测等方面提供了强大的工具和全新的思路。智能医学即建立在现代医学基础上,融合医疗大数据、人工智能和元宇宙等前沿技术,旨在挖掘疾病发生、发展与演变的客观规律,并探索智能化疾病诊疗方法及其临床实践应用的新兴交叉学科。智能医学在辅助医生诊断、减少漏诊误诊、提高诊断效率、弥补资源供需缺口、疾病风险预警、提供健康顾问服务、支持药物研发、提升制药效率等方面发挥着越来越重要的作用。未来智能医学的应用将进一步拓展,包括更加智能化的疾病诊断和治疗方案的开发,以及对药物研发和临床试验的辅助等。本期专论着眼于智能医学,所载论文详细阐述了智能医学发展的现状与趋势、大语言模型的技术创新及其在临床医学中的应用,为进一步促进人工智能与医学的融合发展提供借鉴和参考。

# 智能医学:数据与模型驱动的医工融合

刘 雷 曾丽艳

(复旦大学智能医学研究院 上海 200032)

**[摘要]** **目的/意义** 总结数据与模型驱动下智能医学发展的现状与趋势,以提升临床医疗水平,助推智能医学的发展与应用。**方法/过程** 介绍智能医学产生的背景,阐述大数据融合与驱动、人工智能、元宇宙医疗、医工融合创新人才对智能医学发展的影响和具体应用。**结果/结论** 智能医学是医学未来发展方向之一,其发展有赖于大数据算力和存储平台建设、健康医疗大数据标准与规范建设、医学人工智能技术、智能医学相关伦理与法规建设和交叉型人才队伍建设等。

**[关键词]** 智能医学;人工智能;大数据;元宇宙;医工融合

**[中图分类号]** R-058 **[文献标识码]** A **[DOI]** 10.3969/j.issn.1673-6036.2023.07.001

## Intelligent Medicine: Data and Model-driven Medicine and Engineering Integration

LIU Lei, ZENG Liyan

Intelligent Medicine Institute, Fudan University, Shanghai 200032, China

**[Abstract]** **Purpose/Significance** To summarize the status quo and trend of the development of intelligent medicine driven by data and model, so as to improve the level of clinical medicine and promote the development and application of intelligent medicine. **Method/Process** The paper introduces the background of the emergence of intelligent medicine, and expounds the impact of big data integration and drive, artificial intelligence (AI), metaverse medical care, innovative talents of medicine and engineering integration on the development of intelligent medicine as well as specific application. **Result/Conclusion** Intelligent medicine is one of the future development directions of medicine, and its development depends on the big data computing power and the construction of storage platform, the

**[修回日期]** 2023-06-04

**[作者简介]** 刘雷,教授,博士生导师。

construction of health and medical big data standards and norms, medical AI technology, the construction of ethics and regulations related to intelligent medicine, the construction of interdisciplinary talent team, etc.

[**Keywords**] intelligent medicine; artificial intelligence (AI); big data; metaverse; integration of medicine and engineering

## 1 引言

随着大数据、云计算、人工智能 (artificial intelligence, AI) 等新兴技术蓬勃发展, 现代医学、生命科学、工程科学高度交叉融合, 促使医学模式从工程医学演进到智能医学。Topol E J<sup>[1]</sup> 将智能医学定义为将 AI 与医学融合, 利用大数据和机器学习等技术实现精准的个体化医疗, 以提供更好的疾病预防、诊断、治疗和管理。Rajkomar A 等<sup>[2]</sup> 认为智能医学指利用机器学习和深度学习等技术, 从大规模医疗数据中提取知识和模式, 用于诊断、预测和个性化治疗。智能医学是建立在现代医学基础之上, 融合了医疗大数据、AI 和元宇宙等前沿技术, 旨在挖掘生命的本质, 疾病发生、发展与演变的规律, 并探索智能化疾病诊疗方法及其临床实践应用的新兴交叉学科<sup>[3]</sup>。

大数据的积累和多样性为 AI 的训练和学习提供更广泛的资源, AI 的引导和优化有助于实现大数据的智能化利用, 改善决策效果和提供个性化服务<sup>[4-5]</sup>, 而元宇宙作为大数据和 AI 的融合, 提供智能化的交互和体验<sup>[6]</sup>, 大数据、AI、元宇宙与智能医学的发展相互依赖、相互促进。大数据和 AI 为智能医学提供数据分析和决策支持的基础和能力, 而元宇宙则为远程医疗提供创新解决方案, 为智能医学带来更加沉浸式和个性化的医疗体验<sup>[1]</sup>。大数据、AI 和元宇宙的结合为智能医学带来巨大的创新和发展潜力。

## 2 大数据融合和驱动是智能医学发展的基础

### 2.1 数据融合与数据治理

随着生物医学研究的飞速发展, 大量电子健康记录、临床治疗、医学图像、多组学 (基因组、宏

基因组、表观基因组、转录组、蛋白质组、代谢组) 等数据不断积累, 已经形成从微观层面、分子层面、基因层面到个体、群体的跨尺度、大规模的数据量和知识体, 蕴含巨大研究及临床应用价值, 为智能医学发展提供数据基础。然而, 医疗数据通常呈现出多模态异构特征且分散分布, 底层数据库的数据整合、治理和标准化, 以及多模态数据融合技术还有很大提升空间。数据融合指应用特征级融合、模型级融合, 基于深度学习的融合方法 (如神经网络、卷积神经网络和循环神经网络等技术), 将来自不同数据源的、分散的、异构的数据整合到一个一致的数据集中的过程, 旨在消除重复数据、处理数据冲突、填补缺失值等, 提供可信、完整的数据资源, 支持临床决策<sup>[7-8]</sup>。数据治理包括制定数据管理策略、定义数据标准、建立数据质量评估机制、确保数据访问权限和责任等, 是对数据的管理和监控过程, 旨在确保数据在整个生命周期中得到有效管理, 确保数据使用的道德性、责任性和可持续性<sup>[9-10]</sup>。因此, 数据融合依赖于数据治理, 确保数据质量、一致性和可靠性, 并满足数据访问和隐私保护的要求, 而数据治理提供了数据融合的框架、规范和控制, 确保融合过程中的数据质量、安全性和合规性<sup>[7-12]</sup>。特别是当医学大数据涉及多病种、多模态和多来源时, 采用数据融合和数据治理等新技术对生物医学等多模态信息进行有效利用和挖掘, 是提高疾病治疗临床决策水平和精准防控的迫切要求<sup>[13]</sup>, 也是智能医学学科建设的重要方向。

### 2.2 多模态数据融合和驱动

数据融合和数据治理为数据驱动的决策和分析提供必要的数据集成、质量保证和可靠性支持<sup>[14-15]</sup>。医疗机构和研究机构利用机器学习、深度学习、数据挖掘和大数据融合等方法分析大量的健康数据和组学数据, 从而识别疾病风险因素、优

化诊断和治疗方案, 基于数据驱动进行临床决策制定和业务优化。如心血管疾病的发生发展与基因、肠道微生物、生活环境和方式等因素相关, Shen L 等<sup>[16]</sup>收集心血管疾病患者的微生物组数据和临床数据, 并对这些心血管疾病相关异质性数据进行结构化、融合和解析, 开发和构建出稳健模型, 并获得该疾病的微生物群生物标志物, 实现基于数据驱动的心血管疾病个性化和精准化治疗; 前列腺癌是全球发病率和死亡率较高的恶性实体肿瘤, 遗传、生活方式和环境因素的复杂性和多样性相互作用促进其细胞进化, Lin Y 等<sup>[17]</sup>通过融合不同数据资源(如组学和医学图像)进行计算建模, 模拟前列腺癌发展过程中的动态变化, 从嘈杂的、多结构的数据中识别和区分特定的生物标志物和危险因素, 实现基于数据驱动的前列腺癌精准化诊断和治疗临床决策。在医院智慧化建设方面, 如传染性疾病预防期间, Zhai Y 等<sup>[18]</sup>应用数据驱动的智能优化技术(如机器学习和优化算法)对相关护理数据和排班需求(包括护理人员工作时间表、患者需求和护理任务优先级等)进行分析和建模, 并结合智能调度算法, 建立基于数据驱动的智能医疗服务平台, 实现医院人力资源快速配置, 进一步筛选出现代医疗的最优管理方案。通过多模态数据的融合以及模型驱动, 基于授权和控制、联邦学习、安全沙箱等技术对医学大数据进行加密隐私计算, 能够保证这些医学数据在不同方式授权下得到合理利用, 使医生可以更加清晰地掌握疾病的发展趋势和潜在风险, 更加科学和客观地作出医疗决策, 提高医疗质量和效率。

### 3 AI 是智能医学发展的助推力

#### 3.1 AI 及其医学应用

AI 指能够执行与人类智能相关的若干任务(如决策、视觉感知、语音识别和推理等)的计算框架和算法, 包括机器学习、深度学习、计算机视觉和自然语言处理(natural language processing, NLP)<sup>[19]</sup>。其中, 大语言模型(large language models, LLMs)是 NLP 重要组成部分之一, 是在经历

了统计语言模型(如基于马尔科夫链预测)、神经网络语言模型(如循环神经网络、长短期记忆网络)和预训练语言模型(如 GPT-1、GPT-2、BERT)这 3 个语言模型阶段后发展出来的基于千亿参数模型规模和超大算力的第 4 阶段语言模型, 该语言模型(如 GPT-3、PALM、ChatGPT、LLaMA、GPT-4)可通过训练大规模的语料库创建文本、图像、音频、代码和视频等新内容, 是生成式 AI 应用程序的关键组件<sup>[20]</sup>。LLMs 为实现更智能、更人性化的语言处理和人机交互提供强有力的技术支持, 基于大语言模型、文本模型和图像模型的生成式 AI 应用程序得到广泛关注, 如用于文本生成的 BERT、GPT-3、GPT-4; 用于对话的 LaMDA、OPT-175B 和 BlenderBot; 用于图像生成的 DALL-E2; 用于语音生成的 Whisper; 用于生成化学、蛋白质组学和 DNA/RNA 方面内容的 BioNeMo<sup>[20-21]</sup>。

AI 技术正加速向传统生物医学、医疗健康和药物研发等行业渗透和融合。传统生物医学工程相对来说更关注数据的采集和单一设备的数据分析, 而智能医学所涉及的更多是多模态数据, 从分子层面到个体层面、再到群体层面的数据融合以及模型驱动, 并基于大数据融合和驱动设计更好的 AI 模型, 模拟整个医疗过程, 为医生提供更多的临床辅助决策支持。药学、影像学、病理学、护理学和公共卫生管理均可与 AI 融合, 发展出 AI 药学<sup>[22]</sup>、AI 医学图像诊断<sup>[23]</sup>、AI 传染病监测<sup>[24]</sup>、AI 慢病管理<sup>[25]</sup>、AI 医保<sup>[26]</sup>等。尤其在 AI 药学和 AI 医学图像诊断方面的研究已经取得很大进展。

#### 3.2 AI 药学

新药的开发是一个漫长过程, 而且成功率很低。据估计, 每一种药物的平均研发投资为 13 亿美元, 非肿瘤学药物开发约需 5.9~7.2 年, 肿瘤学药物开发约需 13.1 年, 所有药物开发项目最终获得批准的比例是 13.8%<sup>[27]</sup>。随着 AI 技术的日趋成熟, AI 工具在药物发现和开发中越来越多地被采用, 如通过 AI 技术整合和分析大规模基因组数据、蛋白质组数据和临床数据等, 生成预测模型应用于预测药物-靶点相互作用、化合物库的虚拟筛选以

及发现具有增强抗病毒活性的潜在药物候选物，可加速有效抗病毒药物的开发和改善传染病患者治疗和预后<sup>[28]</sup>；利用 AI 开发的首个强迫症药物已进入临床试验，该药物从最初的筛选到临床前试验结束不到 12 个月，而使用传统方法则需要 4 年，降低研究成本和加快新药开发过程<sup>[29]</sup>。药物设计的一个重要步骤是了解蛋白质的精确形状（决定其在健康中的功能，以及疾病中的功能障碍）。因此，开发准确预测蛋白质三维结构的方法，对新药的发现和疾病的认识具有重要意义。最具代表性的预测蛋白质三维结构的工具为 AlphaFold<sup>[30-31]</sup>，仅基于蛋白质的一维氨基酸序列采用 AI 网络方法就能准确预测三维结构。这种创新方法将极大促进基础研究和药物开发，并指导设计出更安全、更有效的治疗和预防疾病的方法。未来药物研发将通过知识图谱推理和更加精准的蛋白质三维结构预测工具，识别药物靶点，对该蛋白的成药性进行大致判断并进行药物分子设计，经过分子对接，找到小分子前体，进一步进行药理实验和临床试验，能够更快、更便宜、更有效地开发药物。此外，在新药进行临床试验之前，该药物的药代动力学/药效动力学特征也可以在构建模型上进行虚拟模拟，大大加快从药靶到小分子成药，进入临床试验的过程。AI 应用于药物设计与筛选、靶点发现、早期药物研发、临床前试验的设计和治疗、试验现场的性能和试验数据质量的监测、现有药物的再利用等，可以降低药物研发的周期和成本<sup>[32]</sup>，为患者带来更多福祉。

### 3.3 AI 医学图像诊断

80% 的临床数据是以图像的形式存储，包括放射科的 X 线透视片、电子计算机体层摄影、磁共振成像等医学影像、病理活检图像、内镜影像等。疾病的检查和诊断大多需要参考医学图像。然而，医学图像对成像设备和成像环境的依赖性很大。与自然图像相比，医学图像更复杂，表现在以下几个方面<sup>[33]</sup>。一是图像类型多，差异大，难以合并。二是图像大多为非可见光成像，通常表现出特定信号的强度值，信噪比低。三是靶区与非靶区病灶的颜色、灰度、纹理等外观差异较小。四是图像像素较

大，目标本身缺乏固定的大小、形状、灰度、纹理等明显特征，存在个体、成像原理、成像环境导致的较大差异。五是受成像原理和成像环境的影响，图像中含有各种伪影。基于 AI 深度学习模型的医学图像处理，可以为医学知识与疾病辅助诊断、大规模筛查系统的深度融合提供有效的交互方式，如通过对原始图像的可视化方法量化习得病理的特异性，利用任务特异性的可解释特征区分临床情况，提高诊断透明度和降低决策风险。如早期肺部恶性肿瘤和癌前病变很难用人眼通过医学成像等传统诊断操作识别，而失去手术治疗的最佳机会，研究人员提出一种新型混合智能诊断框架——基于深度融合特征的可靠网络，应用于肺电子计算机体层摄影图像对恶性和良性肿瘤细胞进行快速精准的检测和分类<sup>[34]</sup>。在解决睡眠评估和早期诊断人类睡眠障碍问题上，研究人员提出一种基于睡眠分期的高精度睡眠计算 AI 方法分析患者临床多导睡眠图传感器的大数据集，评估准确率超过 90%，为加快睡眠评估过程和减轻医生工作负担提供有效手段<sup>[35]</sup>。因此，AI 医学图像的高效诊断和较高准确率可以为患者提供可解释的快速诊断依据，并将医务人员从重复和复杂的诊疗任务中解放出来。

## 4 基于数字孪生的元宇宙医学是智能医学发展的新阶段

### 4.1 数字孪生及其医学应用

数字孪生是有生命的实体（如人类、动物、植物等）或无生命的实体（如商业模型、产品、流程、系统、事件、机器、建筑等）的虚拟化身，允许真实实体和虚拟化身之间实时交互和交流，对真实实体的整个生命周期进行智能评估、优化和预测，帮助建模、监控、理解和优化真实实体的功能和行为<sup>[36]</sup>。数字孪生已广泛引入航天、汽车、物流和城市等复杂系统。例如，工厂的在线运行监测，交通、物流、天气预报等的实时监测，以及卫星或空间站的远程控制和维护。在医学领域，可将数字孪生视为虚拟化身，旨在制定个性化医疗策略，以改善诊断和治疗。基于数字孪生为患者治疗的步骤

可简单概括为：首先，构建与个体患者的疾病机制相关所有分子、表型和环境因素的无数个网络模型（即个体数字孪生）；其次，用数千种药物对这些数字孪生进行计算和模拟治疗，以确定表现最佳的药物；最后，用筛选出来的最佳药物治疗患者<sup>[37]</sup>。研究人员还提出一种自适应的动态肺癌患者数字孪生，使用基线特征预测治疗反应，如果预测不符合预期，可以重新分配治疗。在维持阶段，肺癌患者数字孪生将评估耐药机制，进而对患者耐药性进行有效治疗<sup>[38]</sup>。该方法利用癌症研究、AI 和计算技术领域的最新成果，成功构建用于监测治疗反应和治疗耐药性的患者数字孪生。数字孪生将帮助临床医生尽早发现问题，预测疾病发展，并指导医生对患者及时监测、收集数据和选择合适的治疗方法。Al-Zyoud I 等<sup>[39]</sup>构建一个数据驱动的数字孪生系统，采用现代计算机视觉/图像处理和远程光容积扫描技术远程感知和融合人类生物信号：心率、呼吸频率和血氧饱和度，在医院急诊中可用于生物信号快速筛查、远程监测老年患者的健康和实时预警，防止患者健康进一步恶化。基于数字孪生开发的硅脑（神经形态芯片）<sup>[40-41]</sup>，将患者特定的生物学特征，包括大脑结构、病理和功能特征联系起来，通过整合生物模式和 AI 计算的各个方面，模拟数字大脑，重新捕获不同尺度的脑回路和生物过程，可能会彻底改变药物开发和神经条件下的个性化治疗和康复。

## 4.2 元宇宙医学

随着数字孪生技术、虚拟现实、增强现实、物联网、云计算、AI 和第 5 代移动通信等科学技术的创新与成熟，一个物理世界和虚拟世界相结合的超大空间——元宇宙应运而生<sup>[42]</sup>。元宇宙是一个与现实世界完全相同的虚拟世界。元宇宙医学联盟（International Association and Alliance of Metaverse in Medicine, IAMM）曾发布专家共识，将 2022 年定义为“元宇宙医学”的第 1 年，并将医学的元宇宙定义为通过虚拟现实或增强现实增加技术实践的医学物联网<sup>[43]</sup>。基于个体数字孪生的元宇宙医疗是指

将个体患者的所有数据，包括从基因到日常生活习惯，以个体孪生的方式在虚拟空间里重建，基于这个虚拟人物，综合利用虚拟现实、增强现实、物联网等最新智能技术手段，构建医院的数字场景（虚拟医院），为医生和患者在虚拟世界中提供身临其境的体验。医生和患者使用数字化身相互交流，生成和交换信息。在虚拟医院中，患者可以接受多种医疗服务，如治疗、手术、咨询等。患者的数据将被发送到可解释的 AI 模型，用于分析、预测和诊断疾病。AI 模型将为疾病及其预测提供逻辑推理。医学专家检验预测结果，并据此为患者提供治疗。基于个体数字孪生的元宇宙医疗有几个潜在好处。一是患者在家中就能获得部分医疗服务，医生可以远程虚拟地为患者检查，并有一种身临其境的体验，为残疾患者和居家患者带来更多便利。二是元宇宙数据提供医疗资源和服务的快速交付，将降低患者延迟获得紧急医疗服务而导致的死亡率。三是对缺乏医疗专业人员和医生的偏远地区，通过虚拟现实、增强现实技术可提供无缝的患者监测和治疗。四是减少患者去医院的次数，并有助于预防传染病和流行病。五是医生在对患者手术之前，可获得广泛的解剖指导和手术模拟培训，模拟和控制不同的情况，提高治疗成功率，降低医疗服务成本<sup>[44]</sup>。

基于个体数字孪生的元宇宙医学的应用还处于起步阶段。如创建了“虚拟护士”，可随时与患者互动，指导患者和家属的日常护理，还实时监控患者安全、医生活动、入院和出院活动<sup>[45]</sup>。尤其对高血压、糖尿病、肥胖等慢性病和一些有心理健康问题的患者，医护人员可以使用远程医疗服务和关联家庭的设备（如可穿戴传感器和智能手机应用程序）在多维虚拟诊所中访问患者，监测其健康状态并提供有效帮助<sup>[46]</sup>。因此，基于个体数字孪生的元宇宙医疗，构建全息数字与虚拟现实技术相结合的虚拟场景和远程医疗场景，形成医护人员与患者的现实和虚拟世界互动，如智能导诊、辅助/自动诊断，最终实现从预防、诊治到预后的患者全生命周期管理，是智能医学发展的新阶段。

## 5 医工融合的创新人才建设是智能医学发展的关键

在智能医学学科发展过程中,医工融合的创新人才起关键作用。新医科需要医学与文、理、工、法各学科的交叉融合,通过发展精准医学、转化医学、智能医学等医学新专业,促进我国现阶段医疗模式向“环境-社会-心理-生物-工程”的现代医学模式转化。《健康中国行动(2019—2030年)》要求,促进以治病为中心向以健康为中心转变。新医科建设是健康中国战略的重要基础,而智能医学是新医科建设的重要组成部分,因此,精准满足公众对生命质量和健康安全不断变化的新需求,不断提高医疗卫生水平,努力培育医工融合的创新人才,是智能医学学科建设和发展的初心与使命。

智能医学的创新特征就是在交叉领域去深挖,去实现重大突破,占据交叉领域的制高点,关键是未来交叉型的医工融合创新人才队伍建设。医工融合创新人才通常是跨学科的专业人员,具备医学和工程学科知识背景,还掌握先进的信息技术和数据科学技能,并能够将工程学科的技术和方法应用于医学领域,开发出智能医学的创新技术和解决方案<sup>[3, 47-48]</sup>。复旦大学智能医学研究院以复旦大学临床医学、基础医学、药学、脑科学、护理学、公共卫生学等“双一流”建设学科为基础,将计算机科学、数据科学、统计学、AI等多个学科深度融合,在智能医学人才建设方面采取以下措施。一是由医学、药学、类脑科学、计算机科学、统计学、生物学等不同学科领域的专家和研究人员组成交叉学科创新团队,并定期举行交叉学科研讨会,研究合作项目以及交流访问,以促进思想碰撞和知识共享,合作研究、共同探索智能医学领域的前沿问题。二是建立符合国际标准的智能医学研究生培养体系,包括根据智能医学领域的需求和发展趋势,开设和更新涵盖医学、计算机科学、数据分析、伦理法律等领域相关知识的课程;建立研究生与国内外高水平医疗机构、研究机构和企业交流、实践与合作机制;建立智能医学科科研项目申请和科技竞赛奖励机

制,加强研究生的科研创新意识和科学素养培养。三是构建智能医学产业合作平台,研究人员和研究生通过平台实现资源共享、人才培养和项目合作,共同开展智能医学研究和技术创新,促进智能医学成果的转化与应用。复旦大学智能医学研究院的目标是助力新医科人才和高水平复合型人才培养,建设国际一流的智能医学学科,推动我国智能医学领域的发展与创新。

## 6 结语

智能医学在国家科技创新体系中具有非常重要的战略地位。智能医学的发展离不开大数据算力和存储平台、健康医疗大数据标准与规范、健康医疗大数据技术、生命组学分析技术、医学AI技术、智能医学相关伦理与法规建设、交叉型人才队伍建设。同时,智能医学的发展应瞄准医学学科前沿,致力于促进学科融合创新,聚力打造一批战略科技力量,部署一批战略性和基础性前沿项目,突破一批卡脖子关键核心技术,强化对关系全局的智能医学科技硬实力系统性布局,共同推动医学发展和成果传播,为医疗临床服务,为卫生改革发展服务,为保障公众健康服务。

## 参考文献

- 1 TOPOL E J. High-performance medicine: the convergence of human and artificial intelligence [J]. *Nature medicine*, 2019, 25 (1): 44-56.
- 2 RAJKOMAR A, DEAN J, KOHANE I. Machine learning in medicine [J]. *New England journal of medicine*, 2019, 380 (14): 1347-1358.
- 3 刘哲, 石钰, 林延带, 等. 智能医学的现状与未来 [J]. *科学通报*, 2023, 68 (10): 1165-1181.
- 4 WANG S Y, PERSHING S, LEE A Y, et al. Big data requirements for artificial intelligence [J]. *Current opinion in ophthalmology*, 2020, 31 (5): 318-323.
- 5 ZHANG F, ZHANG Z, XIAO H. Research on medical big data analysis and disease prediction method based on artificial intelligence [J]. *Computational and mathematical methods in medicine*, 2022, 2022: 4224287.

- 6 AHUJA A S, POLASCIK B W, DODDAPANENI D, et al. The digital metaverse: applications in artificial intelligence, medical education, and integrative health [J]. *Integrative medicine research*, 2023, 12 (1): 100917.
- 7 UGON A, GUESSANT S, TSOPRA R. Data fusion to convert drug consumption quantities into defined daily doses [J]. *Studies in health technology and informatics*, 2020, 270: 133 – 137.
- 8 CASIAN T, NAGY B, KOVACS B, et al. Challenges and opportunities of implementing data fusion in process analytical technology – a review [J]. *Molecules*, 2022, 27 (15): 4846.
- 9 MULLER S H A, VAN THIEL G, VRANA M, et al. Patients' and publics' preferences for data – intensive health research governance: survey study [J]. *JMIR human factors*, 2022, 9 (3): e36797.
- 10 MCMAHON A, BUYX A, PRAINSACK B. Big data governance needs more collective responsibility: the role of harm mitigation in the governance of data use in medicine and beyond [J]. *Medical law review*, 2020, 28 (1): 155 – 182.
- 11 EVANS E A, DELORME E, CYR K, et al. A qualitative study of big data and the opioid epidemic: recommendations for data governance [J]. *BMC medical ethics*, 2020, 21 (1): 101.
- 12 WANG M, LI S, ZHENG T, et al. Big data health care platform with multisource heterogeneous data integration and massive high – dimensional data governance for large hospitals: design, development, and application [J]. *JMIR medical informatics*, 2022, 10 (4): e36481.
- 13 SHARMA S, GUPTA Y K, MISHRA A K. Analysis and prediction of COVID – 19 multivariate data using deep ensemble learning methods [J]. *International journal of environmental research and public health*, 2023, 20 (11): 5943.
- 14 MOWRY E M, BERMEL R A, WILLIAMS J R, et al. Harnessing real – world data to inform decision – making: multiple sclerosis partners advancing technology and health solutions (MS PATHS) [J]. *Frontiers in neurology*, 2020, 11 (8): 632.
- 15 SORENSEN K. From project – based health literacy data and measurement to an integrated system of analytics and insights: enhancing data – driven value creation in health – literate organizations [J]. *International journal of environmental research and public health*, 2022, 19 (20): 13201.
- 16 SHEN L, SHEN K, BAI J, et al. Data – driven microbiota biomarker discovery for personalized drug therapy of cardiovascular disease [J]. *Pharmacological research*, 2020, 161 (11): 105225.
- 17 LIN Y, ZHAO X, MIAO Z, et al. Data – driven translational prostate cancer research: from biomarker discovery to clinical decision [J]. *Journal of translational medicine*, 2020, 18 (1): 119.
- 18 ZHAI Y, LI R, YAN Z. Research on application of meticulous nursing scheduling management based on data – driven intelligent optimization technology [J]. *Computational intelligence and neuroscience*, 2022 (9): 293806.
- 19 DZOBO K, ADOTEY S, THOMFORD N E, et al. Integrating artificial and human intelligence: a partnership for responsible innovation in biomedical engineering and medicine [J]. *OMICS: a journal of integrative biology*, 2020, 24 (5): 247 – 263.
- 20 ZHAO W X, ZHOU K, LI J, et al. A survey of large language models [EB/OL]. [2023 – 05 – 16]. <https://arxiv.org/pdf/2303.18223.pdf>.
- 21 DAVENPORT H T, MITTAL N. How generative AI is changing creative work [EB/OL]. [2023 – 05 – 16]. <https://hbr.org/2022/11/how-generative-ai-is-changing-creative-work>.
- 22 YANG X, WANG Y, BYRNE R, et al. Concepts of artificial intelligence for computer – assisted drug discovery [J]. *Chemical reviews*, 2019, 119 (18): 10520 – 10594.
- 23 MCKINNEY S M, SIENIEK M, GODBOLE V, et al. International evaluation of an AI system for breast cancer screening [J]. *Nature*, 2020, 577 (7788): 89 – 94.
- 24 WANG Y C, TSAI D J, YEN L C, et al. Clinical characteristics of COVID – 19 patients and application to an artificial intelligence system for disease surveillance [J]. *Journal of clinical medicine*, 2022, 11 (5): 1437.
- 25 ZAFARI H, LANGLOIS S, ZULKERNINE F, et al. AI in predicting COPD in the Canadian population [J]. *Biosystems*, 2022, 211 (12): 104585.
- 26 PARK S H, CHOI J, BYEON J S. Key principles of clinical validation, device approval, and insurance coverage decisions of artificial intelligence [J]. *Korean journal radiology*, 2021, 22 (3): 442 – 453.
- 27 WONG C H, SIAH K W, LO A W. Estimation of clinical trial success rates and related parameters [J]. *Biostatistics*,

- 2019, 20 (2): 273 – 286.
- 28 TARASOVA O, POROIKOV V. Machine learning in discovery of new antivirals and optimization of viral infections therapy [J]. *Current medicinal chemistry*, 2021, 28 (38): 7840 – 7861.
- 29 FARGHALI H, KUTINOVA CANOVA N, ARORA M. The potential applications of artificial intelligence in drug discovery and development [J]. *Physiological research*, 2021, 70 (S4): 715 – 722.
- 30 SENIOR A W, EVANS R, JUMPER J, et al. Improved protein structure prediction using potentials from deep learning [J]. *Nature*, 2020, 577 (7792): 706 – 710.
- 31 JUMPER J, EVANS R, PRITZEL A, et al. Highly accurate protein structure prediction with AlphaFold [J]. *Nature*, 2021, 596 (7873): 583 – 589.
- 32 KOLLURI S, LIN J, LIU R, et al. Machine learning and artificial intelligence in pharmaceutical research and development: a review [J]. *The AAPS journal*, 2022, 24 (1): 19.
- 33 GAO Z, LOU L, WANG M, et al. Application of machine learning in intelligent medical image diagnosis and construction of intelligent service process [J]. *Computational intelligence and neuroscience*, 2022, 2022: 9152605.
- 34 RAMANA K, KUMAR M R, SREENIVASULU K, et al. Early prediction of lung cancers using deep saliency capsule and pre – trained deep learning frameworks [J]. *Frontiers in oncology*, 2022, 12 (6): 886739.
- 35 ARSLAN R S, ULUTAS H, KOKSAL A S, et al. Automated sleep scoring system using multi – channel data and machine learning [J]. *Computers in biology and medicine*, 2022, 146 (7): 105653.
- 36 EL SADDIK A, LAAMARTI F, ALJA' AFREH M. The potential of digital twins [J]. *IEEE instrumentation & measurement magazine*, 2021, 24 (3): 36 – 41.
- 37 BJORNSSON B, BORREBAECK C, ELANDER N, et al. Digital twins to personalize medicine [J]. *Genome medicine*, 2019, 12 (1): 4.
- 38 CARRILLO – PEREZ F, MORALES J C, CASTILLO – SECILLA D, et al. Machine – learning – based late fusion on multi – omics and multi – scale data for non – small – cell lung cancer diagnosis [J]. *Journal of personalized medicine*, 2022, 12 (4): 601.
- 39 AL – ZYOUD I, LAAMARTI F, MA X, et al. Towards a machine learning – based digital twin for non – invasive human bio – signal fusion [J]. *Sensors*, 2022, 22 (24): 9747.
- 40 HU M, ZHONG Y, XIE S, et al. Fuzzy system based medical image processing for brain disease prediction [J]. *Frontiers in neuroscience*, 2021, 15 (7): 714318.
- 41 DANG J, LAL A, FLURIN L, et al. Predictive modeling in neurocritical care using causal artificial intelligence [J]. *World journal of critical care medicine*, 2021, 10 (4): 112 – 119.
- 42 LEE L H, BRAUD T, ZHOU P, et al. All one needs to know about metaverse: a complete survey on technological singularity, virtual ecosystem, and research agenda [EB/OL]. [2023 – 05 – 16]. <https://arxiv.org/pdf/2110.05352.pdf>.
- 43 YANG D, ZHOU J, CHEN R, et al. Expert consensus on the metaverse in medicine [J]. *Clinical ehealth*, 2022, 5: 1 – 9.
- 44 ALI S, ABDULLAH, ARMAND T P T, et al. Metaverse in healthcare integrated with explainable AI and blockchain; enabling immersiveness, ensuring trust, and providing patient data security [J]. *Sensors*, 2023, 23 (2): 565.
- 45 SCHUELKE S, AURIT S, CONNOT N, et al. Virtual nursing: the new reality in quality care [J]. *Nursing administration quarterly*, 2019, 43 (4): 322 – 328.
- 46 DEBON R, COLEONE J D, BELLEI E A, et al. Mobile health applications for chronic diseases: a systematic review of features for lifestyle improvement [J]. *Diabetes & metabolic syndrome*, 2019, 13 (4): 2507 – 2512.
- 47 朱宇凡, 赵欣, 杨志强, 等. “人工智能 + 医学” 复合型人才培养展望 [J]. *医学信息学杂志*, 2021, 42 (7): 83 – 87.
- 48 李伟锋, 杜育任, 姚旺, 等. 我国智能医学高等教育发展的思考 [J]. *医学信息学杂志*, 2021, 42 (12): 85 – 87, 84.