

DOI: 10.13376/j.cblls/2023011

文章编号: 1004-0374(2023)01-0072-08



李祯祺，副研究员。中国科学院上海营养与健康研究所团委副书记，中国科学学与科技政策研究会技术预见专委会会员，上海市科技情报学会会员，上海市科技翻译学会会员，主要从事生命科学与生物技术领域的战略情报及学科情报研究。

2022年数字健康发展态势

李丹丹，陈大明，刘樱霞，杨露，李祯祺*

(中国科学院上海营养与健康研究所，中国科学院上海生命科学信息中心，上海 200031)

摘要：生物技术、数字技术等新兴技术的快速发展，为面向人民生命健康的融合创新提供了源动力，“数字健康”应运而生。近年来，随着居民收入的增加、消费结构的升级、人口老龄化及城镇化的加速发展，数字健康的应用场景不断丰富，发展空间不断拓展。2022年，国内外数字健康科技与产业均取得了新发展，包括政策的推动、前沿技术的突破以及产品的上市等。本文从政策、科技以及产业的创新链角度总结了数字健康的最新进展，并对数字健康的发展趋势进行展望。

关键词：数字健康；人工智能；远程医疗；大数据

中图分类号：G35；R197 **文献标志码：**A

Development trend of digital health in 2022

LI Dan-Dan, CHEN Da-Ming, LIU Ying-Xia, YANG Lu, LI Zhen-Qi*

(Shanghai Information Center for Life Sciences, Shanghai Institute of Nutrition and Health,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200031, China)

Abstract: The rapid development of emerging technologies such as biotechnology and digital technology has provided the impetus for the integrated innovation of people's health and safety, and "digital health" came into being. In recent years, with the growth of personal income, the upgrading of consumption structures, the acceleration of population aging and urbanization, the application scenarios of digital health have been continuously enriched and the development space has been continuously expanded. In 2022, digital health technology and industry at home and abroad have achieved new progress, including the promotion of policies, breakthroughs in cutting-edge technologies and the launch of products. This paper summarizes the latest progress of digital health

收稿日期: 2023-01-13

基金项目: 中国科学院文献情报能力建设专项“生命健康领域战略情报决策信息产品建设”项目；中国科学院文献情报能力建设专项“生命健康智能情报分析模型研究”项目

*通信作者: E-mail: lizhenqi@sinh.ac.cn

from the perspective of policy, technology and industrial innovation chain, and prospects the development trend of digital health.

Key words: digital health; artificial intelligence; telemedicine; big data

当前, 数字经济蓬勃发展, 数字技术正在深刻改变着人们的生活。数字技术在生命健康领域的融合运用, 为构建以人民为中心的全生命周期数字化管理体系提供了系统性支撑, 驱动了多层次、全方位、全周期健康服务的发展。自 2022 年以来, 世界各国(地区)积极布局数字健康领域的创新与应用, 政策、科技、产品、运营等要素的融合, 驱动了数字健康的长足进步。为解析数字健康的发展态势, 尤其是凝练 2022 年以来数字健康的发展新特点, 本文对数字健康的典型发展态势加以解析, 并就其未来发展加以展望, 以期对相关研究和布局提供参考。

1 数字健康的发展历程

健康是生命的最佳状态, 健康数据是生命状态的外在表征, 生物技术和信息技术的融合发展为理解生命、维护健康、防控疾病提供了“数字健康”的应用场景。近现代以来, 人类对生命系统的解析经历了“个体 → 器官 → 组织 → 细胞 → 基因”的“格物致知”历程; 21 世纪以来, 人类对于生命健康的理解进入到“建物致知”的水平(图 1)。在从“格物致知”向“建物致知”的研究范式转变进程中, 数字技术的融合应用, 一方面拓展了生命健康研究的深度、广度和精度, 另一方面提升了全方位、全周期、全链条保障人民健康的体系效能。在生物技

术与信息技术的深度融合下, 数字健康正成为人工智能(AI)等新兴技术的典型应用场景之一。

如今, 数字健康已成为各类健康相关硬件(智能手机、可穿戴设备、传感器等)、服务(远程医疗、远程监控、移动医疗应用程序等)、数据管理和运用(数据科学、电子健康记录、人工智能等)的结合点。世界卫生组织(WHO)认为, 数字健康是与开发和利用数字技术改善健康相关的知识和实践领域, 包括广泛的智能设备、使用智能连接设备的数字消费者, 以及与物联网、人工智能、大数据和机器人技术相结合的健康服务等内容^[1]。从内涵上看, 数字健康的范围涵盖了数字疗法(Digital Therapeutics, DTx)等内容, 但又远大于数字疗法等(图 2)^[2]。

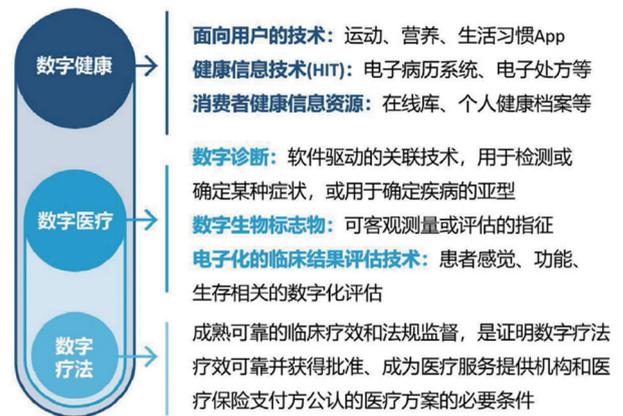


图2 数字健康、数字医疗、数字疗法的关系^[2]

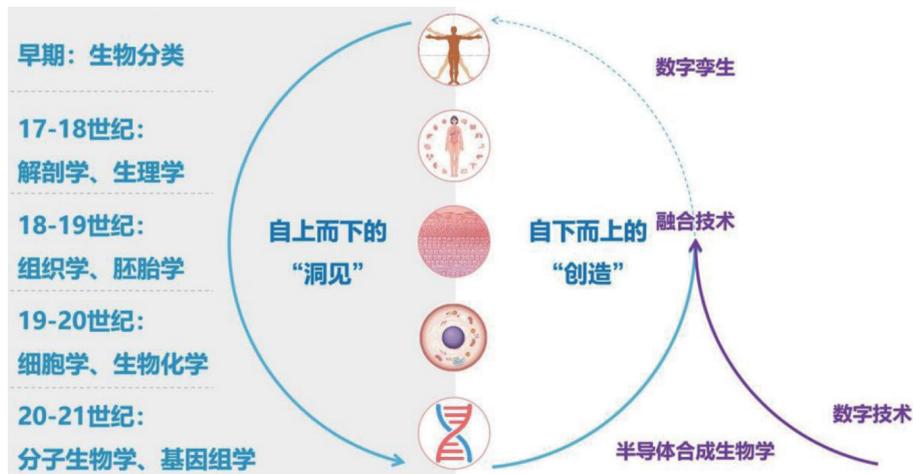


图1 生物技术和数字技术的融合驱动数字健康的发展

数字健康的发展，始于技术的更新迭代，由此推动了医疗保健和软件/硬件/算法领域的进步。从20世纪50年代开始，各种数据分析和统计技术(数学模型、贝叶斯分析、模式识别等)开始越来越多地被应用于医疗诊断。1947年，Jacob Yerushalmy评估了用于X射线医学诊断的统计假设检验方法。1994年，自动内窥镜优化定位系统(AESOP)成为首个获得美国食品药品监督管理局(FDA)批准的机器人。美国国家航空航天局(NASA)的机器人辅助显微手术系统是第一个允许使用核磁共振成像而不是电子计算机断层扫描(CT)的神经外科机器人系统。20世纪70年代初，世界卫生组织以健康为重点，将远程医疗一词引入“提供医疗保健服务”，表示使用信息和通信技术通过增加就医途径和医疗信息来改善患者的治愈效果。20世纪90年代互联网开始兴起，基于信息和通讯技术的电子健康(e-Health)开始被关注和用于改进预防、诊断、治疗、监测和管理以及获得护理和护理质量。随着移动设备(例如智能手机)的不断普及，移动医疗(m-Health)开始兴起，世界卫生组织认为移动医疗是由移动设备支持的医疗和公共卫生实践，例如移动电话、患者监测设备、个人数字助理，以及其他无线设备。从2015年开始，国外数字健康概念开始逐步清晰和统一。2016年，WHO发布官方文件《监测与评估数字健康干预措施》(Monitoring and Evaluating Digital Health Intervention)，正式提出了“数字健康”概念。2017年，美国FDA发布《数字健康创新行动计划》

(Digital Health Innovation Action Plan)，开设专门板块，启动了数字健康产品专门认证的通道^[3]。2019年10月，WHO发布《全球数字健康战略草案(2020—2024)》，确立了数字健康战略优先地位，提出在全球范围内推动数字健康发展的战略目标和行动指南^[1]。

时至今日，医疗健康大数据及其标准规范已发展为支撑数字健康发展的重要基础，对医疗卫生行业发展和社会进步具有重要意义(图3)。通过对公共卫生、健康医疗、疾病预防等各方面的数据进行采集、处理、存储、分析，为个人和社会提供健康管理与健康服务的系统，是“数字中国”建设的重要组成部分。随着数字健康的迅速发展，数据管理能力成为衡量国家医疗卫生行业软实力的重要指标^[4]。1987年，卫生信息交换标准(Health Level Seven, HL7)交换标准成立。为更适应行业的发展需求，HL7版本不断更新，从1987年的HL7 1.0版本、1988年的HL7 2.0版本，到2005年的HL7 3.0版本。但随着技术的发展，这些版本的标准难以适应医疗机构复杂的信息系统间的互操作，于是2011年新的互操作性标准——快速医疗互操作性资源(FHIR)开始启动。2014年，新一代医疗信息互操作标准试用(Standard for Trial Use, STU)第一版正式开始，随后还更新了几次版本，直到2018年才最终确认规范第一版(First Normative)4.0。2020年，医疗信息互操作标准HL7 FHIR5.0版本开始开发，还启动了FHIR新型流行病的疫情应对项目(Situational

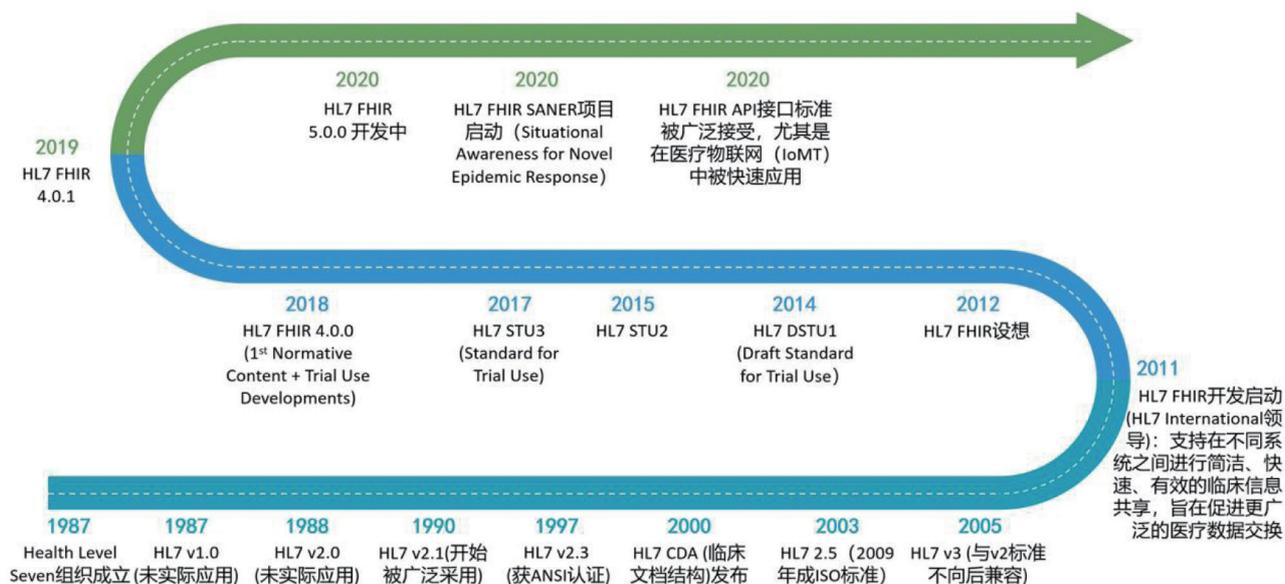


图3 国际健康数据互操作性标准的开发历程

Awareness for Novel Epidemic Response, SANER)。另外, HL7 FHIR 的应用程序编程接口 (API) 标准被更多国家和地区广泛接受并应用, 尤其是在医疗物联网上 (如医疗可穿戴设备)。

2 数字健康的新发展

2022 年以来, 在多方因素的推动下, 数字健康加速发展。这种发展的动力, 既有政策布局 and 治理体系完善带来的数字健康发展生态优化, 也有数字健康科技和产品开发驱动产业升级, 还有投资者和企业等布局带来的新发展。由此, 数字健康发展呈现出诸多的新特点。

2.1 政策引导、监管协同、前瞻治理保障数字健康的良性发展

世界各国重视数字健康战略发展, 政策支持体系逐步完善。在具体应用方面, 美国白宫于 2022 年发布的《国家药物管制政策战略报告》中提到, 要推动数字疗法成为帮助治疗药物滥用的潜在工具, 并鼓励各机构向国会寻求授权以支付报销费用, 考虑在医疗保健计划中向用数字疗法为患者提供服务的企业报销应急管理费用^[5]。在监管保障方面, 为确保医疗设备的安全性和有效性, 美国 FDA 于 2022 年修订了《医疗器械中的网络安全: 质量体系考虑和上市前提交的内容指南》草案^[6]; 在健康数据服务方面, 欧盟健康和食品安全总局于 2022 年 5 月启动欧洲健康数据空间计划 (EHDS)^[7], 目标是向欧盟居民提供创新、先进的医疗支持体系, 打破医疗行业数据壁垒, 促进数据有效利用, 解决欧盟成员国之间交叉引用健康数据的问题。英国政府在 2022 年 7 月更新的《英国数字战略》(UK Digital Strategy)^[8] 中提出, 要继续利用数字和数据驱动的创新来改进治疗、护理模式以及健康和护理系统的运作方式。

聚焦数字健康发展, 我国颁布多项相关政策规划支持创新发展。近年来, 我国政府高度重视数字经济发展, 在“十四五”规划和 2035 年远景目标纲要中, 对发展数字健康产业均做出了明确部署并围绕上述规划和纲要于 2022 年颁布多项政策对该领域给予大力扶持, 包括《“十四五”公共服务规划》《“十四五”数字经济发展规划》《“十四五”中医药信息化发展规划》《“十四五”卫生健康标准化工作规划》和《“十四五”全民健康信息化规划》等。其中, 2022 年 11 月, 国家卫健委发布的《“十四五”全民健康信息化规划》明确提到, “培育数字健康

经济产业新业态。聚焦战略前沿推进重点领域数字健康产业发展, 立足重大技术突破和重大发展需求, 增强产业链关键环节竞争力, 完善重点产业供应链体系, 加速产品和服务迭代。”在地方层面上, 各地不断加强数字健康的布局。例如, 海南省于 2022 年 10 月 11 日首次推出全周期数字疗法产业支持政策——《海南省加快推进数字疗法产业发展的若干措施》, 围绕数字疗法产业的产品研发、注册审批、应用、支付、产业集聚、数据安全、人才保障及资本支持等各方面提出了针对性的措施。

2.2 科学研究、技术突破、工程应用促进数字健康的交叉融合

数字健康是数字技术与医疗健康内容相结合的实践形式^[9]。例如, 通过自然语言处理技术, 使机器人具备理解医疗数据的能力; 利用深度学习技术提高识别疾病的准确率; 利用图像处理实现智能辅助诊断等。随着互联网、大数据、云计算、物联网、人工智能、虚拟现实/增强现实为代表的数字技术快速发展, 全球数字健康科技领域在 2022 年度取得重要进展。

2.2.1 人工智能、机器学习和算法驱动数字健康的智能分析与预测

随着算力、算法、算据水平的不断提高, 以及在深度学习、图像处理等子领域取得的前沿突破, 人工智能赋能疾病预测、药物研发、医学影像等方向的进一步发展。面对复杂重大慢病中的神经退行性疾病, 无论是全新痴呆风险预测模型 UKB-DRP^[10], 还是利用深度学习和高内涵筛选技术开发的疾病细胞特征发现平台^[11], 都能够前瞻性智能预测阿尔茨海默病的发病风险, 或成功识别出新型细胞标志物。利用 AI 技术平台, 不仅能够精准地从头设计出能够穿过细胞膜的大环多肽分子^[12], 而且可以识别抗衰老和与年龄相关疾病的潜在靶点^[13], 还能够通过蛋白质与药物结合过程中的构象变化来预测药物-蛋白质亲和力^[14]。尤其是在智能医疗影像辅助诊断方面, 基于神经网络的人工智能模型可以通过分析常规 X 线照片或生物标志物等, 实现疾病的有效鉴别, 目前已应用于结直肠癌/腺瘤^[15]、孤独症^[16]、乳腺癌^[17]、甲状腺癌^[18]等疾病。

2.2.2 健康信息技术、基础设施和数据管理驱动数字健康的安全访问与共享

数字健康需要多个利益相关方的协同监管, 医疗数据系统、医疗信息平台、电子健康记录系统等数据平台的构建与设计首要的考虑因素就是数据安

全与隐私保护问题, 这为区块链等技术在健康护理数据管理过程中的应用带来了机遇与挑战^[19]。在去中心化与分布式的解决方案中, 星际文件系统(IPFS)^[20]、拜占庭容错(PBFT)医疗区块链信息管理系统^[21]、基于以太坊的医疗数据管理系统^[22]、基于Hyperledger Fabric的医疗数据共享解决方案^[23]等脱颖而出, 不仅提供了更快的检索速度和更为稳定的数据访问能力, 而且在实现医疗信息存储和共享的同时, 还可防止医疗信息数据被篡改或泄露。此外, 为应对医院电子医疗记录系统所面临的信息孤岛、数据被盗、监管困难等诸多痛点, 基于身份认证、分级访问、数据脱敏等方面的技术应用也取得诸多进展。例如, 基于区块链的身份验证访问控制框架^[24]、引用智能合约和环签名技术的电子病历共享系统^[25]、互联网医疗身份认证系统^[26]、互联网医疗服务监管平台存储系统^[27]、避免患者信息泄露的音频水印方案^[28]等, 均在身份认证、安全隐私、交互共享等方面作出重要贡献。

2.2.3 远程医疗、医疗机器人等医护模式驱动数字健康的医患交互与诊疗

远程医疗是数字健康的重要组成部分, 近两年受新冠疫情的影响其潜在的价值与产品力得到释放, 经历了指数级增长, 并迈向可持续发展^[29]的阶段。对于此类医疗保健模式, 人们往往关注其与面对面的诊疗服务之间的差异, 以及护理结果的对比。通过儿童和青少年精神病学^[30]、类风湿关节炎^[31]、儿科语言病理学^[32]、性别多元化青年的远程性别确认^[33]、基于远程医疗的阿片类药物治疗的可行性和临床影响^[34]等案例的评估或对照研究, 发现其护理质量与面对面服务并无明显差异, 可以作为一种护理选择或可行的交付方式。

精准医疗背景下的手术机器人主要面向微创或远程精细操作, 并已将用途逐渐拓宽至医疗机器人领域。在传统手术机器人领域, 无人指导的智能组织自主机器人STAR^[35]、可帮助医生对中风或动脉瘤患者进行快速治疗的远程机器人系统^[36]相继问世。在以手术切除膀胱患者健康生活质量为对象的调研中, 手术机器人甚至能更好地帮助提高大多数患者的生活质量^[37]。此外, 我国微创医疗旗下的鸿鹄骨科手术机器人于2022年7月获得FDA 510(k)的上市许可, 成为目前首个且唯一一款获得FDA认证的中国国产手术机器人^[38], 全自动无针头疫苗注射机器人^[39]和奥朋Allvas®血管介入手术机器人^[40]的单中心临床试验也相继取得成功。

2.2.4 虚拟成像与可穿戴设备、传感器等设备驱动数字健康的动态监测与治疗

虚拟现实(VR)、增强现实(AR)等虚拟成像技术打破了数字虚拟世界与物理真实世界的界限, 在医学成像、外科手术、临床治疗、远程医疗、医学/健康教育等方面具有广泛的应用前景。虚拟现实工具能够在虚拟现实环境中完成药效团的生成、编辑以及基于药效团的虚拟筛选等工作^[41], 也能够通过患者的沉浸式体验来减少手术所需的局部麻醉量^[42], 甚至改善癌症患者的认知功能、心理健康和失眠的潜在影响^[43]。此外, 人工智能驱动的自适应技术可用于优化可穿戴医疗设备的资源配置, 如智能和互联医疗保健设备的能源效率、电池寿命^[44], 以及传输数据量、内存使用量和计算成本最小化^[45]。

2.3 资本扶持、巨头布局、产品研发塑造数字健康的产业动能

由于数字化创新正迅速推动医疗保健行业的发展, 数字健康市场占比将持续提升。癌症、心血管疾病、糖尿病、阿尔茨海默病和其他需要长期护理和持续监测的疾病等慢性病的患病率不断上升, 这也导致对数字医疗服务的需求不断增加。同时, 智能手机等电子产品和智能设备越来越多地用作健康和健身追踪器, 这有助于数字健康市场的进一步增长。根据市场调查公司未来市场洞见(Future Market Insights)的报告, 2032年全球数字健康市场的估值将达到2 5859.8亿美元, 预计2022年到2032年的年均复合增长率为27.7%^[46]。

鉴于市场长远前景, 资本争先涌入, 尤其近年来受新冠疫情的影响, 数字化优势愈发凸显, 数字健康领域大额融资不断。数字健康领域细分主要包括医疗信息化、数字疗法和互联网+医疗健康三大类, 疫情爆发后, 互联网信息/医疗信息化热度放缓, 投资赛道趋向多元化发展。从国内数字疗法产业集聚状态分析来看, 处于起步阶段的国内数字疗法行业也正在形成产业集聚趋势。其中, 北京、上海、杭州的数字疗法企业相对集中, 数字疗法发展与各地的经济水平、科技力量存在高度关联。

在市场与资本利好发展的同时, 以谷歌、苹果、亚马逊、微软为代表的互联网公司纷纷布局人工智能疾病监测、医疗大数据、智能硬件、未来药房, 以及构建临床试验和药物发现的解决方案等领域。谷歌入局数字健康领域较早, 重点关注人工智能疾病监测和医疗大数据。2022年, 谷歌与League、三星、Northwell Health、Abridge、LifePoint Health

等多家公司在医疗保健、医疗数据等领域达成合作,正式推出了旗下首款智能手表 Google Pixel Watch。该款智能手表包含对 Fitbit 应用程序的深度集成,可通过 Google Home 智能音箱使用其软件以及谷歌助手 (Google Assistant)、谷歌钱包 (Google Wallet) 和智能家居工具的功能,例如全天活动跟踪、连续心率跟踪、睡眠跟踪等。苹果的医疗布局以智能硬件为核心,将打造互通数据平台和升级以苹果手表 (Apple Watch) 为核心的指标监测作为主攻方向。2022 年 6 月,苹果发布了一款新的药物跟踪工具,并启用了更多与健康相关的功能。药物治疗功能可以在苹果手表和 iPhone 的健康应用程序中使用,用户可以管理自己的药物、维生素和补充剂。2022 年 7 月,美国专利商标局 (USPTO) 公布了两项与体感手套相关的苹果专利,指向基于超声波力度触控 (Force Touch) 的虚拟现实手套,以及一种可用来控制智能眼镜的压力传感腕带。此外,亚马逊和微软数据健康布局主要通过合作展开,亚马逊致力于建设从处方到交付的未来药房,而微软正在通过合作进入医药领域,构建临床试验和药物发现的解决方案。

在多重因素的综合推动下,数字健康产品得到了多元化的发展,其中以数字疗法产品进展较快,目前国内外相关产品已陆续获批上市。从 2017 年 Pear Therapeutics 公司的数字疗法产品获得首个 FDA 认证,到 2021 年近 30 个 DTx 产品获得 FDA 等机构的批准。我国在数字疗法也有显著突破。2020 年 11 月,我国国家药品监督管理局 (NMPA) 批准了第一款数字疗法产品,由此揭开我国数字疗法的序幕。2022 年 4 月 28 日,零氦宣布旗下子公司众曦医疗科技的数字疗法产品 TH-002 已获批医疗器械二类注册证,成为国内肿瘤领域的首个获证数字疗法,并已在多个省市开启物价准入申请流程。TH-002 主要面向早期术后肺癌患者,为他们提供个性化院外康复治疗方案,电子化的患者报告临床结局 (ePRO) 理念和加速康复外科 (ERAS) 实践贯彻其中。该产品可根据患者的基线情况以及每日的治疗完成度,自动调节并生成次日任务。

3 数字健康的展望

通过前述分析可以看出,目前数字健康的发展呈现出五大特点:①数字健康正成为各国重点关注领域;②数字技术与医疗健康深度融合;③数字经济与健康产业深度融合;④数字治理不断完善;⑤

数字技术广泛应用于临床实践。对于在不久的将来如何塑造数字健康格局,以下趋势值得进一步关注。

3.1 大健康的应用场景拉动数字健康的发展

受新冠疫情的影响,远程医疗等虚拟护理不断扩大医疗保健的可及性,不仅使医疗护理更容易为人们所获得,而且有助于在患者和服务提供者之间建立更为紧密的联系。以新冠患者为例,许多感染新冠病毒的患者在家中接受远程监测,可以在保证获得远程诊疗服务的同时,停止对医疗资源和医院空间的高度挤兑。这种方法也可以应用于慢性病患者,居家医护(辅以监测+远程护理团队)是患者所期望的新一代护理模式。

远程护理和数字咨询的扩张速度将继续保持下去,但与过去两年的发展相比更可持续、更为成熟稳健。尽管其不会完全取代面对面的诊疗行为,但它们有能力改善广大患者获得医疗保健的机会。当然,数字健康不仅仅是远程医疗,其中必然包括患者的访问、获取和参与。这意味着医院、卫生系统等机构需要找到多种方式与患者互动,包括采用移动应用程序、实时聊天等方式。

3.2 人工智能等技术应用驱动数字健康的升级

人工智能、大数据与云计算的能力会聚融合,为精准医疗提供了极佳的发展机遇,可以更智能地了解、分析乃至解决人们的需求。人工智能本身就是医疗保健领域最强大的创新能力加速器之一。人工智能和机器学习提供的分析可用于实现高度个性化的医疗保健,其中根据对患者状态的持续监控或对数字健康监测平台的高度参与,推荐或自动采取特定的行动方案。这与目前“以患者为中心、以数据为中心、以健康为中心”的医疗保健模式相匹配,个性化的资源配置或解决方案正在提升医疗保健消费者的体验度。例如,临床决策支持系统 (CDSS) 和人工智能通过分析海量医疗和行为数据,能够提供最佳疗法和个性化治疗方案的参考。

3.3 健康设备开发与数据治理开启数字健康新空间

物联网等技术的进步正在逐步扩大实时连续、动态长远地监测人们身体健康状况的可能性。目前,不仅便携式的心电图测试仪与超声设备、直接面向消费者 (DTC) 的基因检测设备相继问世,而且从监测健康参数的智能手表和腕带到智能镜子、智能马桶和智能家居,都是为了在病症出现或为人们所发现之前得到表征,并引起患者或医生的关注。智能传感器收集的数据可以通过 AI 算法自动分析,实现 7×24 小时的全时监测与分析服务。与此同时,

需要注意到随着移动技术、传感器和可穿戴设备的广泛应用,患者生成的健康数据(PGHD)正在成为预防、诊断和治疗方面的宝贵数据源,数据安全和个人隐私亟须严密保护。

3.4 数字服务与标准体系完善助力数字健康的落地

数字健康相关的虚拟产品预计将逐步落地。在国家层面,欧洲国家正试图构建移动健康应用程序市场。德国与比利时已经建立了认证计划,预计法国将很快加入,并有更多的国家紧随其后,后续欧盟国家可能会制定电子处方应用程序的共同标准。在服务提供商层面,数字医疗保健提供商可能不具备诊疗场所与设备等物理设施,但提供在特定条件下的健康监测和指导(例如慢性病)相关的虚拟订阅服务,专注于整体护理、综合健康、改善沟通和自动化健康相关的数据分析。此外,虚拟现实/增强现实等产品在疾病治疗和预防方面的能力不断被挖掘出来,能够用于医学生训练、治疗焦虑症患者、分娩期间陪伴和减轻急性疼痛,乃至临终关怀。

[参 考 文 献]

- [1] 世界卫生组织. 全球数字健康战略草案(2020-2024)[EB/OL]. (2019-10-08)[2023-01-12]. <https://www.who.int/docs/default-source/documents/g4dh0c510c483a9a42b1834a8f4d276c6352.pdf>
- [2] The IQVIA Institute. Innovation in Diabetes Care Technology: key issues impacting access and optimal use[R]. 2020
- [3] FDA. Digital Health Innovation Action Plan[EB/OL]. (2017-07-27)[2023-01-12]. <https://www.fda.gov/downloads/MedicalDevices/DigitalHealth/UCM568735.pdf>
- [4] 徐向东,周光华,吴士勇. 数字健康的概念内涵、框架及推进路径思考. 中国卫生信息管理杂志, 2022, 19: 41-6+84
- [5] Whitehouse. National drug control strategy[EB/OL]. (2022-04-21)[2023-01-12]. <https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2022/04/National-Drug-Control-2022Strategy.pdf>
- [6] FDA. Cybersecurity in Medical Devices: Quality System Considerations and Content of Premarket Submissions [EB/OL]. (2022-04-08)[2023-01-10]. <https://www.fda.gov/regulatory-information/search-fda-guidance-documents/cybersecurity-medical-devices-quality-system-considerations-and-content-premarket-submissions>.
- [7] EFSA. European Health Union: a European Health Data Space for people and science[EB/OL]. (2023-05-03)[2023-01-12]. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_22_2711
- [8] UK. UK Digital Strategy[EB/OL].(2023-07-13)[2023-01-12].https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/1089103/UK_Digital_Strategy_web_accessible.pdf
- [9] 李志,唐波. 数字健康治理的国际经验与启示. 改革, 2020, 37: 145-54
- [10] You J, Zhang YR, Wang HF, et al. Development of a novel dementia risk prediction model in the general population: a large, longitudinal, population-based machine-learning study. *Eclinicalmedicine*, 2022, 53: 101665
- [11] Schiff L, Migliori B, Chen Y, et al. Integrating deep learning and unbiased automated high-content screening to identify complex disease signatures in human fibroblasts. *Nat Commun*, 2022, 13: 1590
- [12] Bhardwaj G, O'Connor J, Rettie S, et al. Accurate *de novo* design of membrane-traversing macrocycles. *Cell*, 2022, 185: 3520-32.e26
- [13] Pun FW, Leung GHD, Leung HW, et al. Hallmarks of aging-based dual-purpose disease and age-associated targets predicted using PandaOmics AI-powered discovery engine. *Aging (Albany NY)*, 2022, 14: 2475
- [14] Wu F, Jin S, Jiang Y, et al. Pre-training of equivariant graph matching networks with conformation flexibility for drug binding. *Adv Sci*, 2022, 9: 2203796
- [15] Fan Y, Mu R, Xu H, et al. Novel deep learning-based computer-aided diagnosis system for predicting inflammatory activity in ulcerative colitis. *Gastrointest Endosc*, 2023, 97: 335-46
- [16] Chen Y, Yan J, Jiang M, et al. Adversarial learning based node-edge graph attention networks for autism spectrum disorder identification. *IEEE Trans Neural Netw Learn Syst*, 2022, [Online ahead of print]
- [17] Wan Y, Tong Y, Liu Y, et al. Evaluation of the combination of artificial intelligence and radiologist assessments to interpret malignant architectural distortion on mammography. *Front Oncol*, 2022, 12: 880150
- [18] Sun Y, Selvarajan S, Zang Z, et al. Artificial intelligence defines protein-based classification of thyroid nodules. *Cell Discov*, 2022, 8: 85
- [19] Yaqoob I, Salah K, Jayaraman R, et al. Blockchain for healthcare data management: opportunities, challenges, and future recommendations. *Neural Comput Appl*, 2022, 34: 11475-90
- [20] Mubashar A, Asghar K, Javed A R, et al. Storage and proximity management for centralized personal health records using an ipfs-based optimization algorithm. *J Circuits Syst Comput*, 2022, 31: 2250010
- [21] Qu J. Blockchain in medical informatics. *J Ind Inform Integr*, 2022, 25: 100258
- [22] 孙静,唐欣. 基于区块链的医疗数据系统设计. 无线互联科技, 2022, 19: 65-7
- [23] Satrio NA, Sukaridhoto S, Al Rasyid MUH, et al. Blockchain integration for hospital information system management. *Bali Med J*, 2022, 11: 1195-201
- [24] Chhikara D, Rana S, Mishra A, et al. Blockchain-driven authorized data access mechanism for digital healthcare. *J Syst Arch*, 2022, 131: 102714
- [25] 李静元,王佳,张珂. 基于区块链和环签名的电子病历共享系统设计. 现代电子技, 2022, 45: 116-20
- [26] 翟运开,桑青原,石金铭,等. 基于区块链的互联网医疗身份认证系统设计及应用. 中国医院管理, 2022, 42: 23-6+30
- [27] 翟运开,王鑫璞,石金铭,等. 基于区块链的互联网医疗

- 服务监管平台存储系统设计. 中国医院管理, 2022, 42: 27-30
- [28] Zhang X, Sun X, Sun X, et al. Robust reversible audio watermarking scheme for telemedicine and privacy protection. *CMC-Comput Mater Con*, 2022, 71: 3035-50
- [29] Thomas EE, Haydon HM, Mehrotra A, et al. Building on the momentum: sustaining telehealth beyond COVID-19. *J Telemed Telecare*, 2022, 28: 301-8
- [30] Folk JB, Schiel MA, Oblath R, et al. The transition of academic mental health clinics to telehealth during the COVID-19 pandemic. *J Am Acad Child Adolesc Psychiatry*, 2022, 61: 277-90. e2
- [31] Ferucci ED, Day GM, Choromanski TL, et al. Outcomes and quality of care in rheumatoid arthritis with or without video telemedicine follow - up visits. *Arthritis Care Rese*, 2022, 74: 484-92
- [32] Campbell DR, Goldstein H. Evolution of telehealth technology, evaluations, and therapy: effects of the COVID-19 pandemic on pediatric speech-language pathology services. *Am J Speech Lang Pathol*, 2022, 31: 271-86
- [33] Sequeira GM, Kidd KM, Rankine J, et al. Gender-diverse youth's experiences and satisfaction with telemedicine for gender-affirming care during the COVID-19 pandemic. *Transgend Health*, 2022, 7: 127-34
- [34] Tofighi B, McNeely J, Walzer D, et al. A telemedicine buprenorphine clinic to serve New York City: initial evaluation of the NYC public hospital system's initiative to expand treatment access during the COVID-19 pandemic. *J Addict Med*, 2022, 16: e40
- [35] Saeidi H, Opfermann JD, Kam M, et al. Autonomous robotic laparoscopic surgery for intestinal anastomosis. *Sci Robot*, 2022, 7: eabj2908
- [36] Kim Y, Genevriere E, Harker P, et al. Telerobotic neurovascular interventions with magnetic manipulation. *Sci Robot*, 2022, 7: eabg9907
- [37] Mastroianni R, Tuderti G, Anceschi U, et al. Comparison of patient-reported health-related quality of life between open radical cystectomy and robot-assisted radical cystectomy with intracorporeal urinary diversion: interim analysis of a randomised controlled trial. *Eur Urol Focus*, 2022, 8: 465-71
- [38] FDA. SkyWalker Total Knee System[EB/OL]. (2022-07-22)[2023-01-12]. https://www.accessdata.fda.gov/cdrh_docs/pdf21/K213873.pdf
- [39] 吴金娇. 同济大学研发国内首款全自动无针疫苗注射机器人[N]. 文汇报, 2022-01-19(7)
- [40] 奥朋医疗. 全球首例机器人辅助主动脉覆膜支架介入手术临床取得成功[EB/OL].(2012-08-02)[2023-01-12]. <https://www.operaterobot.com/Newscon/9.html>
- [41] Liu S, Zhou J, Feng Z, et al. VRPharmer: bringing virtual reality into pharmacophore-based virtual screening with interactive exploration and realistic visualization. *Bioinformatics*, 2022, 38: 4953-5
- [42] Faruki AA, Nguyen TB, Gasangwa DV, et al. Virtual reality immersion compared to monitored anesthesia care for hand surgery: a randomized controlled trial. *PLoS One*, 2022, 17: e0272030
- [43] Zeng Y, Zeng L, Cheng ASK, et al. The use of immersive virtual reality for cancer-related cognitive impairment assessment and rehabilitation: a clinical feasibility study. *Asia Pac J Oncol Nurs*, 2022, 9: 100079
- [44] Zahid N, Sodhro AH, Kamboh UR, et al. AI-driven adaptive reliable and sustainable approach for internet of things enabled healthcare system. *Math Biosci Eng*, 2022, 19: 3953-71
- [45] Arikumar KS, Prathiba SB, Alazab M, et al. FL-PMI: federated learning-based person movement identification through wearable devices in smart healthcare systems. *Sensors*, 2022, 22: 1377
- [46] Future Market Insights. Digital health market outlook (2022-2032)[EB/OL]. (2023-10)[2023-01-12]. <https://www.futuremarketinsights.com/reports/global-digital-health-market>