DOI 10.15302/J-SSCAE-2024.06.004

智慧康养数据高质量发展的思考

王伟轩[1]，尚少梅[1]，王志稳[1]，张路霞[2]，马麟[3]，李娜[4]，吴俊慧[1]，张旭[1]，黎兰[1]，詹启敏[2,5*]

（1. 北京大学护理学院，北京 100191；2. 北京大学健康医疗大数据国家研究院，北京 100191；3. 北京大学医学部主任办公室党委办公室，北京 100191；4. 北京大学医学部科学研究处，北京 100191；5. 中国工程院，北京 100088）

摘要：当前，我国老龄人口体量大、老龄化增速快、养老资源缺口巨大，基于健康数据驱动的养老服务成为解决养老问题的有效手段。本文在厘清智慧康养的概念和发展现状的基础上，分析了智慧康养数据高质量发展对我国养老事业发展的促进作用，提出了主动健康数据、间接健康数据、被动健康数据的分类方法，阐述了（采集）多场景性和瞬时性、多模态和复杂性、跨领域多源数据互联、规模效益递增等智慧康养数据的基本特点。我国智慧康养数据面临着多源异构数据融合、数据安全性和隐私性、数据使用伦理等方面的问题，其高质量发展需要以物联网技术为核心开展智慧康养数据的标准化采集、实时传输和预前处理，通过人工智能技术进行数据特征提取和实时运算，利用区块链技术保障数据安全。进一步提出了智慧康养行业数据标准体系、数字基础设施建设、数字安全和隐私保护、高水平数据开放共享、人才培养模式等方面的发展建议，为智慧康养数据高质量发展研究及实践提供参考。

关键词：智慧康养；数字医疗；数据要素；数据库；数据伦理

中图分类号：TP3；R47　　**文献标识码：**A

Reflection on High-Quality Development of Smart Health Data

Wang Weixuan[1], Shang Shaomei[1], Wang Zhiwen[1], Zhang Luxia[2], Ma Lin[3], Li Na[4], Wu Junhui[1], Zhang Xu[1], Li Lan[1], Zhan Qimin[2,5*]

(1. Peking University School of Nursing, Beijing 100191, China; 2. National Institute of Health Data Science at Peking University, Beijing 100191, China; 3. Office of the President, Peking University Health Science Center, Beijing 100191, China; 4. Office of Scientific Research, Peking University Health Science Center, Beijing 100191, China; 5. Chinese Academy of Engineering, Beijing 100088, China)

Abstract: China's aging population is large in size and is growing rapidly, causing a huge gap in the geriatric care resources. The smart geriatric care service based on health data has become an effective means to solve the geriatric care problem in China. This study presents the concept and development status of smart geriatric care and analyzes the promotion effect of smart geriatric care data on the development of geriatric care services in China. Moreover, it categorizes the smart geriatric care data into active, indirect, and passive health data, and elaborates on the basic characteristics of the smart geriatric care data, including multiple collection scenarios and instantaneity, multi-modes and complexity, interconnection of interdisciplinary multi-source data, and increasing scale benefits. The development of smart geriatric care data in China now faces challenges regarding fusion of multi-source heterogeneous data, data

收稿日期：2024-05-28；**修回日期：**2024-07-21

通讯作者：[*]詹启敏，北京大学健康医疗大数据国家研究院教授，中国工程院院士，研究方向为肿瘤分子生物学、转化医学、健康医疗大数据；E-mail: zhanqimin@bjmu.edu.cn

资助项目：中国工程院咨询项目“应对人口老龄化国家战略相关问题研究”(2022-XBZD-30)

本刊网址：www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

security and privacy, and data use ethics. To support the high-quality development of smart geriatric care data in China, it is necessary to conduct the standardized collection, real-time transmission, and pre-processing of smart geriatric care data using the Internet of Things, realize data feature extraction and real-time computing through the artificial intelligence technology, and safeguard data security using the blockchain technology. Furthermore, recommendations are proposed from the aspects of data standards system, digital infrastructure, digital security and privacy protection, data sharing, and talent training mechanism.
Keywords: smart health data; digital healthcare; data elements; databases; data ethics

一、前言

截至2023年，我国60岁及以上的老年人口达2.97亿人，占总人口的21.1%，庞大的老年人口对我国的医疗、健康和养老服务体系构成巨大挑战。2022年，我国各类型养老床位合计为829.4万张，但每千名老年人的平均床位数不足30张，远低于同期世界发达国家的水平[1,2]，传统养老模式已无法满足老年人的养老和健康需求。近年来，智慧康养在物联网、人工智能、区块链等技术的赋能下，在我国已出台的多部政策推动下[3~5]，为解决我国新时代老年问题提供了一种全新方案。智慧康养的概念最早可追溯到英国生命信托基金会提出的“全智能化养老系统”，其核心功能包括智能化决策、供需精准匹配等[6]。相较于传统的以健康为目标、养老和养生为手段的康养概念[7,8]，智慧康养在丰富其内涵的同时，发展了康养的手段，其智慧的体现便是养老服务由健康数据驱动进而实现的。智慧康养利用物联网技术、可穿戴技术、区块链技术实现居家、养老机构、社区等多场景的数据采集与分析，促进健康知识和健康数据的生成；基于人工智能、大数据、云计算等技术对健康数据的分析，实现精准且个性化的老年健康智能决策[9]。

在智慧康养研究领域，现有研究多围绕在产业、产品、服务等方向。在产业方向，涉及智慧康养产业发展现状[10]、智慧康养产业链整合[11]、智慧康养产业平台构成[12]、智慧康养实现路径等[13]；在产品方面，包含智慧康养助步机器人[14]、智慧康养家居[15]等；在服务方面，覆盖康养智慧康养旅游[16]、居家情景交互[15]、智慧康养社区[17]、情感场景构建[18]等。此外，在智慧康养数据方向上，已有研究多集中在智慧康养数据库的建立与维护[19]、智慧康养数据集构建方法[20]等方面。现有研究主要分布于智慧康养的前端技术和终端应用层面，缺少对于智慧康养核心环节，即智慧康养数据高质量发展的研究。现有研究也证实在智慧康养数据发展过程中存在真实数据缺失、混杂数据干扰、数据标准化不足等问题[20]，因而分析智慧康养数据的种类和特点，阐释智慧康养数据发展面临的问题，寻找智慧康养数据高质量发展的支撑性技术，推动智慧康养数据高质量发展，具有理论价值和实际意义。

本文全面梳理智慧康养数据的类型、特点和领域发展现状，剖析面临的主要问题，阐述物联网、人工智能、区块链等技术对智慧康养数据高质量发展的支撑作用，并提出针对性发展建议，以促进智慧康养数据高质量发展，助力实施健康老龄化战略。

二、智慧康养数据的种类

智慧康养数据是一类与健康相关的，以信息容量大、信息种类多、存储速度快、应用价值高为主要特征的数据[21,22]，其中的健康医疗大数据被认为是国家重要的基础性战略资源[23]。2023年，国家卫生健康委员会发布《卫生健康信息数据元目录》，其内容有总则、人口学及社会经济学特征、健康史等17个部分。其根据不同类型数据特点将卫生健康信息数据划分为卫生健康服务对象信息、医学观察信息、诊断与评估信息等9大类[24]，在这之中包含由医疗服务结构采集且能直接反映个体健康数据的卫生健康服务对象信息、健康危险因素、医学观察信息、诊断与评估信息、计划与干预信息[24]；不直接反映个体健康情况但对个体健康或健康行业造成影响的数据，如卫生健康经济信息、卫生健康资源信息、卫生健康管理信息[24]。国家卫生健康委员会发布的《国家健康医疗大数据标准、安全和服务管理办法（试行）》指出，在人们疾病筛查、疾病治疗、健康管理等过程中产生的一切与健康医疗相关的数据都可以被称为智慧康养数据[22,25]。据此，可将智慧康养数据分为主动健康数据、间接健康数据和被动健康数据。

（一）主动健康数据

随着人民健康素养的不断提升和智慧康养产业的不断发展，主动健康应运而生。主动健康强调个体在维护自身健康中起到的积极作用，鼓励人们选择更加积极有效的手段促进自身的健康，鼓励将“以患者疾病为中心”的健康理念转化为“以人的健康为中心”[26]，这样的健康理念更加契合智慧康养的主题。智慧康养的发展推动了主动健康数据的发展。在过去，人们采取了多种手段来主动谋求自身的健康，然而缺少有效且实时的信息采集装置，使得主动健康过程中大量的健康数据因无法采集或采集不及时而丢失。现如今智能手机、可穿戴设备、智能机器人、智能助行设备、助浴设备等康养装备在满足用户健康与卫生需求的同时，可记录过程中产生的大量健康数据。这类在使用智慧康养装备的主动健康行为过程中测量并记录，经分析处理后能够产生健康促进效果或反映健康状态的数据称为主动健康数据。主动健康数据的种类丰富，包括使用智能手机浏览健康饮食、健康作息、运动技巧等信息时产生的浏览数据；通过蓝牙传输至手机软件中的用户体重、体脂率、人体密度、身高等数据；使用智能助行设备时为控制助行器运动方向而采集的用户面部表情数据和身体重心数据[27]；使用智能助浴设备时为降低用户洗浴过程中跌倒和烫伤的风险而采集的用户运动姿态数据、周围环境数据、水温数据等[28]；智能手表 / 手环等可穿戴设备采集的用户心率、血氧饱和度、周围环境中存在的危险因素等数据[29]。

（二）间接健康数据

健康相关数据指在智慧康养过程中收集的不直接反映个体健康情况但对个体健康或智慧康养行业产生影响的数据[30~32]。研究表明，一个地区若缺乏基础医疗设施和专业的医疗团队，会降低当地居民的就医意愿。过远的距离和过高的交通成本会减少居民的就医行为[33]。在特定文化中和教育背景下，疾病带来的耻辱感也成为影响健康的重要因素[34]。医疗政策和经济水平会通过影响个体的就医意愿和就医行为间接影响健康状况[35]。医疗费用数据不能直接反映个体的健康状况。但通过对医疗费用明细的分析，可以帮助个体合理控制自身的医疗支出，避免不必要的经济负担[36]。商业保险公司可以通过对医疗保险使用数据进行分析，确定所开展医疗领域的保险必要性[37]和保险保障范围[38]，在公共医疗保险覆盖的薄弱环节起到补充和支持作用。健康相关数据种类丰富，包括但不限于交通出行数据、家庭可支配收入数据、文化宗教数据、地区人均购买力数据、地区投送能力数据、地区医疗设施分布、医疗费用和医保使用数据等。

（三）被动健康数据

被动健康通常指在疾病发生后采取的诊疗措施，被动健康数据指个体在医疗保健过程中所收集、存储、传递、管理、分析以及使用的数据集合[39]。《国务院办公厅关于促进和规范健康医疗大数据应用发展的指导意见》指出，鼓励各类医疗卫生机构推进健康医疗大数据采集、存储，加强应用支撑和运维技术保障，打通数据资源共享通道。在推动健康医疗大数据资源共享开放的同时，使原本不属于智慧康养数据的被动健康数据通过数据共享平台、数据库等进入了智慧康养领域。被动健康数据包含有诊疗过程中产生的电子病历数据、医学影像数据、健康管理数据以及生命体征数据等直接反映个体短时或长时健康状况的数据；实验室或检测机构中生物体内器官、组织、细胞和细胞器中的蛋白质、酯类以及代谢产物等特殊生物分子经测量和量化后得到的生物数据[40]。

三、智慧康养数据的特点

（一）智慧康养数据采集的多场景性和瞬时性

随着互联网、物联网技术的不断发展，智慧康养多场景瞬时性数据采集体现在数据采集、处理、分析、决策、应用的全过程。智慧康养应用场景广泛，各类型智慧康养设备能满足医院、社区、居家等不同场景中的使用需求。相较于医院、社区、诊所等卫生服务机构提供的单一封闭环境，居家场景具有环境复杂、人员复杂、信息源复杂等特点[41]。在居家场景中，日常护理和健康信息采集多由家人或家政服务人员承担，因缺乏专业的医疗知识和护理技能，不能及时正确地采集健康信息以及对症状做出正确预警。为了解决上述问题，智慧康养中各类型传感器和智能终端需要在多场景下完成24 h内任意时段的个体数据采集。当前，智能手环可以随

时检测用户的心率、血氧饱和度、体位以及运动信息，在发现异常值后及时提醒使用者并对异常信息进行跟踪采集；借助先进的云计算和流处理技术，可以实时地对智慧康养终端采集到的数据进行处理和分析，在与云端数据库链接后做出相应的健康决策。例如，在使用智能手环监测用户心率时，若发现用户的心率超出正常值范围，手环可以参照以往用户使用数据和相关数据，分析当前用户属于正常还是异常健康状况，并根据分析结果采取实时提醒、实时监控、实时报警等措施。

（二）智慧康养大数据的多模态和复杂性

医疗和实验技术的革新、智能手机的普及以及人们健康意识的提升使得获取个体健康相关信息的渠道和手段在不断增加，个体的健康数据达到了TB级数据量。智慧康养数据涉及一个国家或地区的全体医疗机构或所有人群，具有上千个或者上万个TB级甚至是PB级的数据量，庞大的数据量在降低数据处理效率的同时增加了数据处理的复杂性[42]。智慧康养数据来源广泛且种类丰富，不仅包含医疗数据、生物数据等结构化数据，还包含大量的非结构化数据，如基本健康数据的生活用药习惯，智慧健康数据中的用户姿态、语音、视频监控等数据。这些不同部门、不同装置、不同方法采集的数据增加了智慧康养数据在处理、分析、整合、共享等环节的复杂性。用户个体差异及其行为模式差异也是智慧康养数据复杂性的重要来源之一。

（三）跨领域多源数据互联

在全球数字化和世界大流行疾病的推动下，智慧康养数据应用场景不断拓展，跨领域数据融合创新需求不断增加。智慧康养数据参与到了广泛的跨领域数据合作项目中，构建了一批具有统一数据标准的信息共享平台。不同机构、不同部门甚至是不同领域的数据在平台上互通互联，提高了数据的利用效率，打破了“信息孤岛”[43]。互通互联为医学研究和医学教育提供了更大的样本量，提升了国际化医疗研究水平，促进了医学科学的国际交流；跨领域、跨地域的数据合作优化了医疗资源的国际化配置，通过与数字医疗和人工智能等技术的结合，推动了全球智慧康养服务的进步；国际化的数据合作在全球卫生安全中起到重要作用，以数据为抓手、健康为导向，构建人类健康共同体，共同应对人类面临的大流行病和重大卫生安全问题。

（四）智慧康养数据规模效益递增

一个领域内的数据量越大，数据所代表的数据精度就越高，反映的问题也更加趋近于实际。智慧康养领域内的数据通过各机构之间的信息共享和协作，简化了数据采集和分析环节，避免重复工作[44]。在使用数据时，个体和机构获得的资源不会因为其他用户的使用而减少，数据的价值不因为使用次数的增加而降低。智慧康养数据本身具有多方面的应用价值，数据共享使得数据价值最大化。在很多国家，由政府基金资助的研究数据往往被要求在项目完成后开放授权或共享数据[44]，使得数据在初期的准入和资金成本远低于数据带来的巨大收益和节约的人力、物力、财力、时间成本；智慧康养数据为人工智能等新一代技术在数字医疗和智慧康养领域的应用提供了海量且类型丰富的训练模型，推动了新技术的发展和应用，与此同时新技术的广泛应用进一步降低了数据收集、分析的成本；不同于一般数据具有的时效性，通过对智慧康养数据进行连续动态观测，其积累时间越长，反映的健康问题越好，越能代表人群的健康状态，数据的健康价值越大。数据的应用成本随数据使用规模的增大而下降，数据的应用价值随数据规模的增大而上升，展现智慧康养数据规模效益递增的特性。

四、智慧康养数据高质量发展面临的问题

（一）智慧康养多源异构数据融合问题

智慧康养领域的多源异构数据融合问题由来已久，已经成为领域内数据高质量发展的主要限制因素之一。这些数据来源、数据类型和数据存储格式不同的数据称为多源异构数据。在多源异构数据整合分析过程中发生且最终导致数据融合困难、缓慢甚至中断的各种问题称为多源异构数据融合问题。原始数据质量、数据复杂度以及数据共享机制都会影响数据融合的进程。

在数据采集过程中，不同来源、不同类型、不同的数据采集者和被采集者都可能为数据融合埋下隐患。数据采集方可能具有不同的数据采集规范和标准，这种多样性最终使得数据融合的困难性增

加；被采集者的个体差异性也是数据融合困难的主要影响因素之一。不同个体之中收集到的数据类型不同且数据中包含的健康信息不尽相同，即使数据类型一致，不同个体产生的数据在语义和表达内容上也存在差异，而语义和表达层面的映射和转换基础研究不足，使得数据融合困难；智慧康养领域内的数据可以进行实时采集但却无法实现同步采集，不同的数据在采集时存在不同的时间戳，每种数据采集的时序也不同，难以在正确的时间节点融合数据。在数据采集后对数据进行预处理，去除无效、错误、无关数据，统一数据格式类型，以便于数据存储和数据质量提升。在数据的预处理环节，医疗机构、企业、实验室和个体之间缺乏统一的预处理标准。医疗机构、科研单位、企业的医疗数据大多存储在内部的数据库中或上传至国家的健康数据库中，个人自测数据往往以文字、图片或电子记事本的形式记录。在实践过程中，个体存储的数据可能因为不当的存储方式，遗忘甚至是丢失而部分或全部丧失；因维护不当、网络波动、传输障碍、硬件老化等因素导致数据库出现数据的损耗。

新增的老年人口为智慧康养领域带来海量的数据，但我国数据基础设施建设不足，算力增长无法满足数据在多平台、多系统之间的流转、整合与分析，海量数据自身也使数据融合愈发困难；随着传感器技术的发展，原有无法精准采集或无法实时追踪的数据类型变得可追踪、可采集，这些新增的数据类型缺少数据融合的研究基础，数据融合困难；部分数据库缺少相应的数据管理机制，数据库仅是存储原始数据，而不将数据分类、分批储存。若数据库维护不及时，再分析数据集缺失，将出现数据的意外损失情况。大量的无序无分类数据对数据的调用产生影响，导致数据融合过程中出现数据调用不及时或调用资源不符的问题。

（二）智慧康养数据安全性和隐私性问题

随着智慧康养理念的普及，越来越多的移动健康应用程序（APP）出现，人们通过应用程序获得医疗与保健相关信息。市场上的部分移动健康APP通过开放权限、后台运行等手段，盗取用户的使用数据和个人信息。在一项关于女性移动医疗APP的数据安全和隐私性的调查中发现，几乎所有的APP均会采集与个人健康相关的数据，仅有52%的APP制定了数据隐私相关政策并请求用户授权，甚至有13%的APP在用户授权前就完成了数据的收集。女性移动医疗APP中包含大量如排卵、怀孕、月经周期等个人隐私数据，但大多数（87%）的APP选择了与第三方平台进行数据共享，而在所有的软件中只有57%的APP选择向用户提供数据安全信息[45]。人体基因数据具有极强的特征性和敏感性，可以反映种群特征和家族特征，当人体基因数据与人口统计学数据结合后，原本被模糊化的个人信息将被重新识别[46]。通过家族内成员公开的基因数据可以预测个体基因型和表达性，结合亲缘关系和人口统计学数据，就能够搜索和识别到现实个体[47]。在科学研究中，一旦科研人员在研究中不恰当使用了某些数据，无论是错误分析还是描述不恰当都可能为研究人群带来群体污名化问题[48]。例如，通过基因组数据判断人群的患病率，发现某一人群或某一亚组的患病率较高，很可能导致该人群在生活中受到疾病歧视、工作歧视等问题。一些保险公司和医疗机构也可能向该人群收取更高的保险和医疗费用，甚至因为畏难心理而拒保和拒绝提供医疗服务；群体污名化还可能给家属带来额外的心理负担和经济压力，即使是脱发这样的非传染性和非健康损害性的疾病也会给患者及其家属造成严重的心理负担[49]。

（三）智慧康养数据使用中的伦理问题

随着智能设备和可穿戴设备的不断普及，越来越多的健康数据被智能终端采集，这些数据对医学科研做出了巨大贡献，但数据的所有权存在着一定的复杂性和争议性[50]：第一，现有有关数据的政策和法律还不足，政府缺少监督数据透明化使用的机制；第二，机构给予的安全承诺并没有具体的给出数据共享所带来的风险与收益；第三，数据共享的准入和推出机制不明，存在被智能推荐系统和第三方数据平台私自使用的可能；第四，区别于传统的医疗和生物数据，由手机等智能终端采集的数据中包含有大量隐私数据（位置、消费、联系方式等）。

智慧康养可以对使用者进行全场景瞬时性数据采集，传统的知情同意方式并不适用于智慧康养服务。传统的知情同意要求数据采集者或数据分析者应向数据被采集者说明数据采集的目的、使用方法、使用场景、存储方式、潜在风险和退出机制等

研究计划，并在被采集者知情同意后，进行数据采集和数据处理。当数据量过大时很难征集到每一位被采集者的知情同意。二次利用数据时，由于受试者的家庭住址丢失、联系方式变更、受试者故去等原因很难再次获得受试者关于数据二次处理的知情同意[51]。尽管研究人员采取了模糊个人信息、建立临时分组、大数据抹除个人属性等方式应对此类问题，研究中仍面临着侵犯被采集者的知情权问题[52]。智慧康养服务对象常为老年人，部分老年人缺乏对知情同意的基本认识，可能出现不知情且已采集的数据伦理问题。近年来，泛知情同意（在研究和数据采集初期便要求被采集者放弃对数据使用目的、数据处理方式、存储方式等的知情权）作为解决智慧康养数据知情同意问题的方法逐渐被大家接受，但其实践过程中仍存在推行困难、被采集者反对和由于监管不当而导致数据伦理等问题。

五、支撑智慧康养数据高质量发展的先进技术

（一）物联网技术

目前，全球约有1.75亿个物联网系统为所在家庭提供智慧服务[53]。物联网指通过无线网络、蓝牙、射频识别等技术实现各终端与各设备的互联和数据共享。物联网技术在现代医学中起重要作用，是智慧康养数据高质量发展的基石。在美国，基于物联网技术的智能诊疗设备数量突破1436亿台，7年累计增长率为16%[54]。物联网技术赋能的各类型传感器不仅可以采集心电图、脑磁图、呼吸率等数据[55]，还可以追踪老年人的夜间睡眠模式、个体健康数据以及疾病预后情况[56,57]。物联网设备采集的数据具有动态、连续、实时的优势，不容易出现性能误差。数据采集后随即上传至云端，在数据共享的同时减少了数据传输中数据损耗的发生[53]。物联网技术为多源异构数据融合问题提供了新的解题思路。在多源异构数据融合过程中引入开放关联数据作为第三方中介，可以有效解决智慧康养领域数据类型异构问题、格式异构问题、语义异构问题[58]。采用通用的通信协议，增加不同物联网设备间的互操作性。物联网设备使用数据转换工具将智慧康养数据转换为统一格式，并根据决策树等智能算法，将特征事件及数据进行分类，便于多源异构数据进一步的处理和分析[59]。利用雾计算、边缘计算等手段，实现物联网设备在数据采集近端完成数据的预处理和初步融合，并增强设备实时响应能力。物联网后端服务器通过直接融合、相关特征融合、身份信息融合等手段融合多源异构数据[60]。

（二）人工智能技术

近年来，人工智能被广泛应用在医药卫生、疾病照护、居家护理等领域[61]。人工智能是一类能够独立收集、处理、分析外部环境数据并采取相应措施实现的特定目标技术，通过模仿人类认知思维过程，能够应对复杂目标、复杂系统、智能决策等诸多挑战[62]。人工智能利用深度学习等技术，对数据进行特征提取和学习，使不同格式和类型的数据可以在统一的框架下处理和分析[63]。不同类型的人工智能通过识别并提取智慧康养数据中的核心信息，将其内部的多模态数据整合为健康数据和疾病风险预测信息[64]。例如，人工智能通过图形挖掘框架和卷积神经网络等手段融合、处理，分析冠状动脉造影、超声心动图、心脏磁共振以及电子病例等信息，实现对心血管风险的预测[64]。人工智能可以发现健康干预与健康结局的内在联系并提供合理化解释，梳理各类型数据的内在逻辑，进一步促进多源异构数据的有效融合和应用[65]。在肿瘤学领域中，人工智能不但可以为肿瘤基因组学、组织学、放射学等研究领域提供研究思路，还可以促进多领域数据融合，提高诊断和预后模型的稳定性和准确性并有助于发现新的生物标记物和生物靶点[65]。

（三）区块链技术

随着智慧康养理念的普及，越来越多的智慧康养数据产生，加之物联网、人工智能等技术的不断应用，智慧康养数据的安全性和隐私性面临着重大挑战。已有研究表明，智慧康养领域人工智能的应用会对个体健康数据的去识别、匿名化等过程造成困难，甚至使去识别处理和匿名化处理失败[66]。区块链技术是一种分布式数据库技术，其原理是多个参与节点共同维护一份不可篡改且连续记录的数据，这些数据以时间序列排序的“区块”形式存储，通过网络中的共识机制和通信协议验证用户和信息同步[67]。基于区块链技术的智慧康养数据共享

平台具有安全等级较高的数据共享标准来保障数据的安全，预防数据泄露。针对个人健康数据、电子病例数据等隐私程度较高的数据，在使用时会采用链上与链下身份验证相结合的方式，保证数据的安全性和验证的有效性[68]。区块链技术也常被用于高校、科研院所、医疗卫生企业之间的数据存储和数据共享。已有研究证实，区块链技术可以用于保存并共享智慧康养数据，并且不会显著增加区块链服务运营商、医疗信息提供者、医疗信息使用者之间数据安全和隐私方面的潜在风险[67]。区块链自身具有去中心化的特性，使得区块链数据库相较于传统的集中式数据库更难遭受到网络攻击，并且通过相应的管理软件可以对数据可能的泄露节点进行追踪，进一步保障智慧康养数据的安全性和隐私性[69~71]。

六、智慧康养数据高质量发展建议

（一）建立健全智慧康养行业数据标准体系

破除“信息孤岛”，促进和实现智慧康养数据常态化共享，需建立统一的数据标准和规范体系，确保数据的一致性和共享可操作性。建立可穿戴设备、智慧康养设备等数据的采集标准，明确数据源的接入方式和要求；建立数据管理标准，对原始数据进行分类，统一数据命名标准和同类型数据存储格式，建立再分析数据集，补充缺失数据，提升数据质量，便于管理、检索以及后续的数据分析；建立数据质量标准，对数据的有效性、准确性、完整性、一致性、一致性、可靠性等建立统一的质量分级评价体系，对不符合数据保密性和违反国家法律相关规定的数据予以剔除；建立数据分析标准，对于数据的处理和挖掘，数据清洗、数据预处理、数据特征提取等方面的标准，规定数据跨领域合作中的应用场景和活动范围；建立数据融合标准，推动人工智能等创新技术与应用场景、智能创造与大数据的实践融合。

（二）推动数字基础设施建设

推动数字基础设施建设，建立计算中心和数据中心；优化算力资源配置，实现算力资源的弹性调配机制，提高算力资源使用效率；发展可靠且大容量的数据存储系统；推行云计算、云处理服务，平衡地区间算力差异。增加智能化、微型化、高灵敏度生物传感、康复干预、神经调控、环境感知、脑机接口等智慧康养技术的投入，缩短我国与世界发达国家在智慧康养领域关键技术和核心产品方面存在的差距；加强产业基础设施建设，提升智慧康养产业规模和生产集成化规模，增强国际市场竞争力和影响力；推动智慧康养产品转化和落地，增强人民群众的满足感和健康获益感；提升人民群众对智慧康养产业发展和数据共享的支持度，推动数据共享和数据捐赠机制平稳落地。

（三）加强数字安全和隐私保护

加强医疗、健康领域的数据安全法制建设，制定智慧康养领域的法律条款，设立专职机构监督数据使用全过程；严厉打击数据盗用和数据窃取行为，加大数据安全犯罪的惩治力度，保障人民群众的数据安全和个人隐私；加大数字安全技术的和隐私保护技术的资金投入，支持高校和科研院所开展数据安全和隐私保障方面的基础研究和应用研究；鼓励企业建立专门的数据保护部门，使用密码、人工智能、区块链、数据加密等手段保护数据，使用安全多方运算、同态加密等数据安全手段处理和分析数据；加强智慧康养数据伦理研究，严格界定数据收集、存储和使用界限，完善数据分析参与和退出机制，尊重数据提供者的隐私权和知情权。

（四）推动高水平数据开放共享

推动政府各部门内部建立数据共享平台，在法定范围内逐步向医疗机构、科研院所、企业开放数据端口，建立数据分级共享制度，促进健康数据跨领域合作创新；鼓励政府引导和推动建立全新的数据开放共享机制，从立法层面明确数据所有权和数据开放共享范围；完善数据管理监督模式，提升数据资源共享规模和共享质量；通过税收优惠、资金支持等手段推进跨领域合作，充分释放智慧康养数据价值；加大数据共享、传输、存储基础研究投入，完善数据共享底层架构；建立数据咨询和数据库信息披露平台，提供数据查询、获取、分析和反馈的一站式服务，提升数据共享的便捷性；以良好的用户体验为目标，满足不同类型用户的需求，提升数据分享意愿和动力，在实时数据采集的基础上实现健康管理、健康干预的实时化和远程化。

（五）建立健全人才培养模式

建立健全人才培养模式，开设本科生、研究生融创课程；开展线上线下一贯制课堂，增强实践经验和创新意识，提升人才孵化速度；加强智慧康养学科建设，强调数据要素的基础战略资源地位，打通智慧康养领域高质量数据发展道路；推动“产学研”一体化建设，构建智慧康养领域各板块合作创新机制，推动智慧康养生态建设，打造护理、康复、医疗、人工智能、大数据复合型创新创业团队；开展智慧康养领域的“拔尖人才”“数字人才”培养计划，建设人才培养示范基地，补齐智慧康养领域内跨学科人才和数据人才培养的短板。

利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: May 28, 2024; **Revised date:** July 21, 2024

Corresponding author: Zhan Qimin is a professor from the National Institute of Health Data Science at Peking University, and a member of Chinese Academy of Engineering. His major research fields include tumours molecular biology, translational medicine, healthcare big data. E-mail: zhangqimin@bjmu.edu.cn

Funding project: Chinese Academy of Engineering project “Study on Issues Related to the National Strategy to Cope with Population Ageing” (2022-XBZD-30)

参考文献

[1] 全国老龄工作委员会办公室. 2022 年度国家老龄事业发展公报 [EB/OL]. (2023-12-14)[2024-02-26]. https://www. gov. cn/lianbo/bumen/202312/content_6920261.htm.
Office of the China National Committee on Ageing. National development bulletin on ageing in 2022 [EB/OL]. (2023-12-14)[2024-02-26]. https://www. gov. cn/lianbo/bumen/202312/content_6920261.htm.

[2] 侯汉坡, 位鹤, 王颖超, 等. 我国老年智慧康养平台建设路径研究 [J]. 中国工程科学, 2022, 24(2): 170–178.
Hou H P, Wei H, Wang Y C, et al. Construction path of smart health care platform for the elderly in China [J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(2): 170–178.

[3] 十五部门印发《“十四五”健康老龄化规划》 [EB/OL]. (2023-03-01)[2024-02-26]. https://www.gov.cn/xinwen/2022-03/01/content_5676341.htm.
Fifteen departments issue *The 14th Five-Year Plan for healthy ageing* [EB/OL]. (2023-03-01)[2024-02-26]. https://www.gov. cn/xinwen/2022-03/01/content_5676341.htm.

[4] 中华人民共和国国家卫生健康委员会. 国家卫生健康委办公厅关于开展老年痴呆防治促进行动(2023—2025 年)的通知 [EB/OL]. (2023-05-26)[2024-02-26]. https://www. gov. cn/zhengce/zhengceku/202306/content_6886277.htm.
National Health Commission of the People’s Republic of China. Circular of the General Office of the National Health Commission on the dementia prevention and control promotion action (2023—2025) [EB/OL]. (2023-05-26)[2024-02-26]. https://www. gov. cn/zhengce/zhengceku/202306/content_6886277.htm.

[5] 中共中央 国务院. “健康中国 2030”规划纲要 [EB/OL]. (2016-10-25)[2024-02-26]. https://www.gov.cn/zhengce/2016-10/25/content_5124174.htm?eqid=8f41987b002a7e4a000000026471aa44.
General Office of the State Council of the People’s Republic of China. Outline of the “healthy China 2030” plan [EB/OL]. (2016-10-25)[2024-02-26]. https://www.gov.cn/zhengce/2016-10/25/content_5124174.htm?eqid=8f41987b002a7e4a000000026471aa44.

[6] 白玫, 朱庆华. 智慧养老现状分析及发展对策 [J]. 现代管理科学, 2016 (9): 63–65.
Bai M, Zhu Q H. Analysis of the current situation of smart pension and development countermeasures [J]. Modern Management Science, 2016 (9): 63–65.

[7] 邓晓青, 唐旻子. 人口老龄化背景下康养产业发展的机遇与路径 [J]. 中国标准化, 2024 (3): 132–135, 145.
Deng X Q, Tang M Z. Opportunities and paths for the development of health care industry under the background of aging population [J]. China Standardization, 2024 (3): 132–135, 145.

[8] 薛镇, 刘星月, 丰志强, 等. 我国康养产业资源配置水平及公平性研究 [J]. 中国卫生经济, 2023, 42(12): 66–70.
Xue Z, Liu X Y, Feng Z Q, et al. Research on the resource allocation level and equity measurement of China’s health and pension industry [J]. Chinese Health Economics, 2023, 42(12): 66–70.

[9] 彭青云, 张俊玲, 洪焕森. 我国智慧养老产业政策梳理、应用场景、面临挑战及其对策 [J]. 智能社会研究, 2023 (4): 37–54.
Peng Q Y, Zhang J L, Hong H S. China’s smart elderly care industry policy review, application scenarios, challenges and countermeasures [J]. Journal of Intelligent Society, 2023 (4): 37–54.

[10] 丁文珺, 熊斌. 积极老龄化视域下康养产业的理论内涵、供需困境及发展路径分析 [J]. 卫生经济研究, 2020, 37(10): 3–7.
Ding W J, Xiong B. Analysis on theoretical connotation, supply and demand dilemma and development path of the health care industry from the perspective of active aging [J]. Health Economics Research, 2020, 37(10): 3–7.

[11] 廖喜生, 李扬萩, 李彦章. 基于产业链整合理论的智慧养老产业优化路径研究 [J]. 中国软科学, 2019 (4): 50–56.
Liao X S, Li Y Q, Li Y Z. Research on the optimization path of smart endowment industry based on industry chain integration theory [J]. China Soft Science, 2019 (4): 50–56.

[12] 李彩宁, 毕新华. 智慧养老服务体系及平台构建研究 [J]. 电子政务, 2018 (6): 105–113.
Li C N, Bi X H. Research on the construction of smart pension service system and platform [J]. E-Government, 2018 (6): 105–113.

[13] 雷晓康, 汪静. 健康中国背景下的智慧健康养老: 战略目标、体系构建与实现路径 [J]. 西北大学学报(哲学社会科学版), 2020, 50(1): 131–139.
Lei X K, Wang J. Intelligent healthy old-age care in the background of “healthy China”: Strategic objectives and system construction implementation path [J]. Journal of Northwest University (Philosophy and Social Sciences Edition), 2020, 50(1): 131–139.

[14] 罗榕榕. 老年关怀居家智慧康养助步机器人 [J]. 包装工程,

2023, 44(12): I0016.
Luo R R. Elderly care, home wisdom, rehabilitation and walking robot [J]. Packaging Engineering, 2023, 44(12): I0016.

[15] 周橙旻, 许灿. 康养适老沙发与场景交互设计研究 [J]. 家具与室内装饰, 2021, 28(7): 126–130.
Zhou C M, Xu C. Research on the scene interaction design of wellness sofa for the elderly [J]. Furniture & Interior Design, 2021, 28(7): 126–130.

[16] 张贝尔, 王红, 李元. 康养旅游产业数字化水平调查与提升策略 [J]. 经济纵横, 2022 (12): 112–117.
Zhang B E, Wang H, Li Y. Investigation and optimization strategy in digitalization level of healthy recuperation tourism industry [J]. Economic Review Journal, 2022 (12): 112–117.

[17] 孟宪源, 桑懿. 面向智慧康养的城市社区空间环境设计 [J]. 上海纺织科技, 2022, 50(2): 71.
Meng X Y, Sang Y. Urban community space environment design for wisdom and health [J]. Shanghai Textile Science & Technology, 2022, 50(2): 71.

[18] 黄国梁, 吴红磊. 基于人工情感与情境化的智慧康养创新设计研究 [J]. 装饰, 2024 (1): 139–141.
Huang G L, Wu H L. Research on innovative design of smart care for the aged based on artificial emotion and contextualization [J]. Art & Design, 2024 (1): 139–141.

[19] 张博. “互联网+”视域下智慧社区养老服务模式 [J]. 当代经济管理, 2019, 41(6): 45–50.
Zhang B. The intelligent community nursing service mode in the view of “Internet +” [J]. Contemporary Economic Management, 2019, 41(6): 45–50.

[20] 张麟宇, 涂志莹, 杭少石, 等. 面向智慧康养的数据集构建方法及其应用 [J]. 计算机科学与探索, 2022, 16(7): 1543–1551.
Zhang L Y, Tu Z Y, Hang S S, et al. Data set construction method for intelligent health care and its application [J]. Journal of Frontiers of Computer Science and Technology, 2022, 16(7): 1543–1551.

[21] 国务院办公厅. 国务院关于印发促进大数据发展行动纲要的通知 [EB/OL]. (2015-09-05)[2024-07-19]. https://www.gov.cn/zhengce/content/2015-09/05/content_10137.htm.
General Office of the State Council of the People’s Republic of China. Circular of the State Council on the issuance of the action programme for promoting the development of big data [EB/OL]. (2015-09-05)[2024-07-19]. https://www. gov. cn/zhengce/content/2015-09/05/content_10137.htm.

[22] 中华人民共和国国家卫生健康委员会. 国家健康医疗大数据标准、安全和服务管理办法(试行) [EB/OL]. (2018-07-12)[2024-07-19]. https://wsjkw.sc.gov.cn/scwsjkw/gz1/2021/7/19/c9ccaab68154444e9dc7b257f83493f9.shtml.
National Health Commission of the People’s Republic of China. National healthcare big data standards, security and service management measures (trial) [EB/OL]. (2018-07-12)[2024-07-19]. https://wsjkw.sc.gov.cn/scwsjkw/gz1/2021/7/19/c9ccaab68154444e9dc7b257f83493f9.shtml.

[23] 国务院办公厅. 国务院办公厅关于促进和规范健康医疗大数据应用发展的指导意见 [EB/OL]. (2016-06-24)[2024-02-26]. https://www.gov.cn/zhengce/content/2016-06/24/content_5085091.htm.
General Office of the State Council of the People’s Republic of China. Guiding opinions of the General Office of the State Council of the People’s Republic of China on promoting and regulating the development of healthcare big data applications [EB/OL]. (2016-06-24)[2024-02-26]. https://www. gov. cn/zhengce/content/2016-06/24/content_5085091.htm.

[24] 中华人民共和国国家卫生健康委员会. 卫生健康信息数据元目录第 1 部分: 总则 [EB/OL]. (2023-10-17)[2024-07-19]. http://www. nhc. gov. cn/fzs/s7852d/202310/b02b9e310c25477faeff44b2be8ef1a1/files/749d6faed52d445e94606817c9308093.pdf.
National Health Commission of the People’s Republic of China. Catalogue of health information data metadata part 1: General provisions [EB/OL]. (2023-10-17)[2024-07-19]. http://www.nhc.gov.cn/fzs/s7852d/202310/b02b9e310c25477faeff44b2be8ef1a1/files/749d6faed52d445e94606817c9308093.pdf.

[25] 国务院办公厅. 国务院办公厅关于促进“互联网+医疗健康”发展的意见 [EB/OL]. (2018-04-25)[2024-07-19]. https://www.gov.cn/zhengce/content/2018-04/28/content_5286645.htm.
General Office of the State Council of the People’s Republic of China. Opinions of the General Office of the State Council on promoting the development of “Internet + medical health” [EB/OL]. (2018-04-25)[2024-07-19]. https://www. gov. cn/zhengce/content/2018-04/28/content_5286645.htm.

[26] 卢文云, 张伟国, 黄忠明. 主动健康视阈下我国体医融合健康促进体系优化研究 [J]. 天津体育学院学报, 2023, 38(6): 703–711.
Lu W Y, Zhang W G, Huang Z M. Optimization of health promotion system for sports-medicine integration from the perspective of proactive health [J]. Journal of Tianjin University of Sport, 2023, 38(6): 703–711.

[27] Rabhi Y, Mrabet M, Fnaiech F. A facial expression controlled wheelchair for people with disabilities [J]. Computer Methods and Programs in Biomedicine, 2018, 165: 89–105.

[28] King E C, Holliday P J, Andrews G J. Care challenges in the bathroom: The views of professional care providers working in clients’ homes [J]. Journal of Applied Gerontology, 2018, 37(4): 493–515.

[29] Shi W Y, Gao X, Cao Y Q, et al. Personal airborne chemical exposure and epigenetic ageing biomarkers in healthy Chinese elderly individuals: Evidence from mixture approaches [J]. Environment International, 2022, 170: 107614.

[30] Widayanti A W, Green J A, Heydon S, et al. Health-seeking behavior of people in Indonesia: A narrative review [J]. Journal of Epidemiology and Global Health, 2020, 10(1): 6–15.

[31] Huang M Z, Zhang H, Gu Y X, et al. Outpatient health-seeking behavior of residents in Zhejiang and Qinghai Province, China [J]. BMC Public Health, 2019, 19(1): 967.

[32] Roberts T, Shiode S, Grundy C, et al. Distance to health services and treatment-seeking for depressive symptoms in rural India: A repeated cross-sectional study [J]. Epidemiology and Psychiatric Sciences, 2020, 29: e92.

[33] Jennings H M, Morrison J, Akter K, et al. Care-seeking and managing diabetes in rural Bangladesh: A mixed methods study [J]. BMC Public Health, 2021, 21(1): 1445.

[34] Lindow J C, Hughes J L, South C, et al. The youth aware of mental health intervention: Impact on help seeking, mental health knowledge, and stigma in U.S. adolescents [J]. Journal of Adoles-

cent Health, 2020, 67(1): 101–107.

[35] Ito T, Kounnavong S, Miyoshi C. Financial burden and health-seeking behaviors related to chronic diseases under the national health insurance scheme in bolikhamxay province, Lao PDR: A cross-sectional study [J]. International Journal for Equity in Health, 2022, 21(1): 180.

[36] Reynolds E L, Gallagher G, Hill C E, et al. Costs and utilization of new-to-market neurologic medications [J]. Neurology, 2023, 100(9): e884–e898.

[37] Shen X L, Spratt D E, Dusetzina S B, et al. Variations in medical necessity determinations across commercial insurance carriers for prostate cancer procedures [J]. International Journal of Radiation Oncology–Biology–Physics, 2023, 115(1): 34–38.

[38] Ngaage L M, Elegbede A, Pace L, et al. Review of insurance coverage for abdominal contouring procedures in the postbariatric population [J]. Plastic and Reconstructive Surgery, 2020, 145(2): 545–554.

[39] 任牡丹, 杨柳, 殷杰, 等. 电子病历数据质量研究的国内外差异 [J]. 中国卫生事业管理, 2023, 40(4): 268–274.
Ren M D, Yang L, Yin J, et al. Study on the difference of data quality researches on electronic medical record at home and abroad [J]. Chinese Health Service Management, 2023, 40(4): 268–274.

[40] 张国庆, 赵国屏, 李亦学. 生物医学大数据生产要素价值的实现: 从数据元素起步 [J]. 生命科学, 2023, 35(12): 1545–1552.
Zhang G Q, Zhao G P, Li Y X. Value realization of biomedicine big data as the production factor: Starting from data elements [J]. Chinese Bulletin of Life Sciences, 2023, 35(12): 1545–1552.

[41] 刘畅, 高炜烨, 金雅庆, 等. 居家养老慢性病患者智慧医疗服务需求研究 [J]. 军事护理, 2024, 41(1): 5–9.
Liu C, Gao W Y, Jin Y Q, et al. Research on demands for smart medical service for home-based elderly patients with chronic diseases [J]. Military Nursing, 2024, 41(1): 5–9.

[42] 俞国培, 包小源, 黄新霆, 等. 医疗健康大数据的种类、性质及有关问题 [J]. 医学信息学杂志, 2014, 35(6): 9–12.
Yu G P, Bao X Y, Huang X T, et al. Medical and health big data: Types, characteristics and relevant issues [J]. Journal of Medical Informatics, 2014, 35(6): 9–12.

[43] 鞠雪楠, 孟芙宇, 王颖思. 数据跨境合作比较研究及建议——以医疗数据为例 [J]. 中国物价, 2024 (2): 35–39.
Ju X N, Meng F Y, Wang Y S. Comparative study and suggestions on cross border cooperation of data: Taking medical data as an example [J]. China Price Journal, 2024 (2): 35–39.

[44] 陈少敏, 陈爱民, 梁丽萍. 医疗大数据共享的制约因素及治理研究 [J]. 卫生经济研究, 2021, 38(9): 18–20, 24.
Chen S M, Chen A M, Liang L P. Research on restrictive factors and governance of medical big data sharing [J]. Health Economics Research, 2021, 38(9): 18–20, 24.

[45] Alfawzan N, Christen M, Spitale G, et al. Privacy, data sharing, and data security policies of women's mHealth apps: Scoping review and content analysis [J]. JMIR MHealth and UHealth, 2022, 10(5): e33735.

[46] Thapa C, Camtepe S. Precision health data: Requirements, challenges and existing techniques for data security and privacy [J]. Computers in Biology and Medicine, 2021, 129: 104130.

[47] Mohammed Yakubu A, Chen Y P P. Ensuring privacy and security of genomic data and functionalities [J]. Briefings in Bioinformatics, 2020, 21(2): 511–526.

[48] Nassani N, El-Khoury R. Decreasing stigmatization of persons with higher weights: When words count [J]. The American Journal of Gastroenterology, 2021, 116(8): 1752.

[49] Schielein M C, Tizek L, Ziehfreund S, et al. Stigmatization caused by hair loss—A systematic literature review [J]. JDDG: Journal der Deutschen Dermatologischen Gesellschaft, 2020, 18(12): 1357–1368.

[50] Kostkova P, Brewer H, de Lusignan S, et al. Who owns the data? open data for healthcare [J]. Frontiers in Public Health, 2016, 4: 00007.

[51] 徐文静, 孙洪强, 徐凌子, 等. 数字医疗临床研究的伦理审查问题研究 [J]. 医学与哲学, 2023, 44(20): 1–4, 21.
Xu W J, Sun H Q, Xu L Z, et al. Ethical review of digital healthcare in clinical research [J]. Medicine & Philosophy, 2023, 44(20): 1–4, 21.

[52] van Roessel I, Reumann M, Brand A. Potentials and challenges of the health data cooperative model [J]. Public Health Genomics, 2017, 20(6): 321–331.

[53] Morita P P, Sahu K S, Oetomo A. Health monitoring using smart home technologies: Scoping review [J]. JMIR MHealth and UHealth, 2023, 11: e37347.

[54] Lin H C, Chen M J, Lee C H, et al. Fall recognition based on an IMU wearable device and fall verification through a smart speaker and the IoT [J]. Sensors, 2023, 23(12): 5472.

[55] Chopade S S, Gupta H P, Dutta T. Survey on sensors and smart devices for IoT enabled intelligent healthcare system [J]. Wireless Personal Communications, 2023, 131: 1957–1995.

[56] Alberdi Aramendi A, Weakley A, Aztiria Goenaga A, et al. Automatic assessment of functional health decline in older adults based on smart home data [J]. Journal of Biomedical Informatics, 2018, 81: 119–130.

[57] Sprint G, Cook D J, Fritz R S, et al. Using smart homes to detect and analyze health events [J]. Computer, 2016, 49(11): 29–37.

[58] 徐博艺, 金初阳, 胡代平, 等. 医联网应用中异源健康数据语义融合方法研究 [J]. 计算机应用研究, 2020, 37(7): 2063–2067, 2071.
Xu B Y, Jin C Y, Hu D P, et al. Heterogeneous healthcare data semantic fusion method for medical IoT application [J]. Application Research of Computers, 2020, 37(7): 2063–2067, 2071.

[59] Yang F, Wu Q L, Hu X P, et al. Internet-of-things-enabled data fusion method for sleep healthcare applications [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(21): 15892–15905.

[60] Krishnamurthi R, Kumar A, Gopinathan D, et al. An overview of IoT sensor data processing, fusion, and analysis techniques [J]. Sensors, 2020, 20(21): 6076.

[61] Robert N. How artificial intelligence is changing nursing [J]. Nursing Management, 2019, 50(9): 30–39.

[62] Chen M, Decary M. Artificial intelligence in healthcare: An essential guide for health leaders [J]. Healthcare Management Forum, 2020, 33(1): 10–18.

[63] Sadasivuni S, Saha M, Bhanushali S P, et al. In-sensor artificial in-

telligence and fusion with electronic medical records for at-home monitoring [J]. IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems, 2023, 17(2): 312–322.

[64] van Assen M, Tariq A, Razavi A C, et al. Fusion modeling: Combining clinical and imaging data to advance cardiac care [J]. Circulation: Cardiovascular Imaging, 2023, 16(12): e014533.

[65] Lipkova J, Chen R J, Chen B W, et al. Artificial intelligence for multimodal data integration in oncology [J]. Cancer Cell, 2022, 40(10): 1095–1110.

[66] Raimundo R, Rosário A. The impact of artificial intelligence on data system security: A literature review [J]. Sensors, 2021, 21(21): 7029.

[67] Tagde P, Tagde S, Bhattacharya T, et al. Blockchain and artificial intelligence technology in e-Health [J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2021, 28(38): 52810–52831.

[68] MacKey T K, Kuo T T, Gummadi B, et al. 'Fit-for-purpose?'—Challenges and opportunities for applications of blockchain technology in the future of healthcare [J]. BMC Medicine, 2019, 17(1): 68.

[69] Kumar A, Singh A K, Ahmad I, et al. A novel decentralized blockchain architecture for the preservation of privacy and data security against cyberattacks in healthcare [J]. Sensors, 2022, 22(15): 5921.

[70] Lee J, Kim M, Park K, et al. Blockchain-based data access control and key agreement system in IoT environment [J]. Sensors, 2023, 23(11): 5173.

[71] Singamaneni K K, Ramana K, Dhiman G, et al. A novel blockchain and bi-linear polynomial-based QCP-ABE framework for privacy and security over the complex cloud data [J]. Sensors, 2021, 21(21): 7300.