人工智能在精准医疗中的应用和前景

**曹瀚文1 ，唐敬轩1**

1 南方科技大学，广东 深圳 518055

**摘 要：**人类社会进入21世纪以来，分子生物学以及分子生物技术的研究发展迅速，同时产生了基因组学、转录组学、蛋白组学、代谢组学等各类组学技术。这些生物学及组学技术的成果不断应用于医学领域，使得现代医学对患者的诊断、治疗、预后都有了更为精确的判断和选择。2011年精准医疗（precision medicine）的概念首次被提出。经过十多年的发展，精准医疗这一理念开始应用于越来越多的领域，包括癌症、糖尿病、心血管疾病等慢性疾病的诊断和治疗，并且取得可观的成果。精准医疗依托于大数据分析的特点使得人工智能在这一领域有很大的应用前景。基于人工智能算法的精准医疗模式开始取得越来越多的临床成果，并且仍在不断应用于更多医疗领域，如影像分析、临床诊断、疗法决策、风险筛查、预后评估等等。尽管人工智能潜力巨大，但目前人工智能在精准医疗方面的应有仍有局限和挑战，如何克服当前存在的问题以及如何更好地将两者结合仍是相关研究者需要不断思考的问题。

**关键词：**精准医疗；人工智能；智能诊断；深度学习；医疗伦理

**Application and Prospect of Artificial Intelligence in Precision Medicine**

Cao Hanwen1, Tang Jingxuan1

1 Southern University of Science and Technology, ShenZhen 518055, China

**Abstract:** Since the beginning of the 21st century, the research on molecular biology and molecular biotechnology has developed rapidly, and various omics technologies such as genomics, transcriptomics, proteomics, and metabolomics have been produced. The achievements of these biology and omics technologies are constantly applied in the field of medicine, which makes the modern medicine have more accurate judgment and choice for the diagnosis, treatment and prognosis of patients. In 2011, the concept of precision medicine was first proposed. After more than a decade of development, the concept of precision medicine has been applied to more and more fields, including the diagnosis and treatment of chronic diseases such as cancer, diabetes, and cardiovascular diseases, and considerable results have been achieved. The characteristics of precision medicine relying on big data analysis make artificial intelligence have great application prospects in this field. The precision medical model based on artificial intelligence algorithms has begun to achieve more and more clinical results, and is still being applied to more medical fields, such as imaging analysis, clinical diagnosis, treatment decision-making, risk screening, prognosis evaluation, and so on. Despite the great potential of artificial intelligence, there are still limitations and challenges in the application of artificial intelligence in precision medicine. How to overcome the current problems and how to better combine the two is still a problem that relevant researchers need to think about.

**Keywords** Precision medicine, Artificial intelligence, Intelligent diagnosis, Deep learning, Medical ethics

引言

当谈到精准医疗时，精确的遗传信息是一个重要的方面。人工智能可以通过深度学习和机器学习算法，帮助医生分析和解读基因组数据，确定遗传变异与疾病之间的关联以及预测患者的疾病风险。通过比对大量的基因组数据，人工智能可以发现基因表达模式和突变模式，从而帮助医生更准确地预测患者的患病可能，以实现疾病早期干预。此外，人工智能还可以从大量的医学图像数据中提取特征和病变信息，通过计算机视觉技术帮助医生发现和评估疾病的进展，制定更精准的治疗方案。人工智能在精准医疗中还可以利用大数据的优势，辅助医生制定个性化的治疗方案。通过分析大量的临床数据、健康信息和基因组数据，人工智能可以帮助医生根据患者的个体特征和疾病特点，制定最适合的治疗方案，提高治疗效果和患者的生存率。此外，人工智能还可以通过智能辅助决策系统，结合临床指南和医学数据库，为医生提供决策支持和治疗建议，帮助他们更好地进行疾病诊断和治疗。除了针对个体的精准医疗，人工智能还可以在公共卫生领域应用。通过分析大量的流行病学数据和社交媒体信息，人工智能可以帮助卫生部门更准确地监测和预测疾病的传播趋势。通过追踪疾病爆发的迹象，预测疫情传播的风险，人工智能可以帮助卫生部门及时采取相应的措施，以控制疾病的传播和蔓延。

然而，人工智能在精准医疗中仍面临一些挑战。首先，医学数据的质量和隐私保护问题需要得到解决。因为医学数据的获取和共享涉及到患者的隐私权和数据安全性，需要建立完善的数据安全和隐私保护机制。其次，人工智能算法的可解释性和可信度也是值得关注的问题，因为在医疗决策中，医生需要了解算法的推理和决策过程，以便做出更准确的诊断和治疗决策。此外，还需要完善法规和伦理规范，确保人工智能在精准医疗中的应用符合伦理和法律的要求，保障患者的权益和隐私。尽管目前人工智能在精准医疗方面存在一些挑战，但随着技术的不断发展和治疗模式的革新，人工智能将为精准医疗带来更多的机会和突破。精准医疗依托于大数据分析的特点，结合人工智能算法，可以提高疾病预防、诊断和治疗的准确性和个性化水平。

本文对近年来精准医疗领域的进展及人工智能在精准医疗领域的应用进行综述，同时总结了人工智能精准医疗目前的局限和挑战。为了更好地将人工智能与精准医疗结合，相关研究者需要克服当前存在的问题，并不断思考如何将两者更好地结合以实现更佳的医疗效果。

1 依托大数据的精准医疗

近年来，在科学和政治观点的推动下，“精准医疗”一词变得非常流行。一般认为精准医疗是一种医疗模式，即通过结合基因组学、生物信息学和医学影像学等技术以及临床数据和个人健康信息，为患者提供定制化的诊断、治疗和预防方案的医疗模式。它的目标是根据个体的遗传特征、环境因素和生活方式等因素，实现更精确、高效和个性化的医疗服务。精准医疗可以帮助医生更好地了解患者的疾病风险，提供更准确的诊断，并为患者制定更有效的治疗方案，从而提高治疗效果和患者的生活质量[1,2]。

另有研究者认为“精准医疗”是一种医学研究方法，它通过识别具有共同生物学基础的患者亚群，为这些患者提供最有效的治疗方法。这种方法需要比传统医疗更少的患者、时间和成本来评估新疗法的有效性。在优化患者的治疗方法时，精准医疗利用了生物信息学技术和基因数据分析，包括：基因测序、蛋白质组学、代谢组学、细胞生物学、病理学研究等。精准医疗的研究治疗方法，对医疗健康领域也具有重要的意义，可以提高治疗效果、降低疾病发生率、优化医疗资源分配、推动医学研究发展等[3]。

同时，相关研究者认为，精准医疗是一种基于深度表型数据的过程，旨在为患者提供最精确的医疗护理。它包括多个反馈循环，没有稳定的终点，需要不断努力变得更加精确。精准医疗的目的是通过临床和其他数据的整合，将患者分为新的亚组，从而实现更精确的治疗方案。精准医疗不是一种特定的治疗方法，而是一个不断发展的过程。在这一过程中，医疗工作者通过大数据整合多源信息，开发用于临床的模型，预测疾病进展和治疗响应。而数据处理和模型构建是框架的两个主要阶段，包括数据挖掘、模型开发和变量选择等关键步骤。模型的传播与沟通也是重要环节，以确保算法的可用性[1,4]。

上述精准医疗的种种方法，无论是生物信息学技术、基因数据分析还是构建和传播新的医疗模型，离不开人工智能的参与和帮助。

2 人工智能与精准医疗

2.1人工智能在精准医疗中的应用

人工智能在精准医疗中的应用主要包括但不限于以下几个方面：

基因测序数据分析：人工智能可以通过分析大量的基因组、转录组、蛋白质组等数据，辅助精准医疗的实现。例如，机器学习技术可以用于预测个体对特定药物的反应，从而实现精准治疗。

影像诊断辅助：人工智能可以通过分析医学影像数据，辅助医生进行疾病诊断。例如，深度学习技术在肺癌、乳腺癌等疾病的影像诊断中已经取得了显著的成果。

药物研发：人工智能可以通过分析大量的化学、生物和临床数据，辅助药物研发过程。例如，机器学习技术可以用于预测药物的毒性、药效等。

基因编辑：人工智能可以通过分析基因序列数据，辅助基因编辑技术的应用。例如，深度学习技术可以用于预测基因编辑的靶点[5,6]。

2023年10月的一篇nature review中，研究者主要讨论了人工智能在风湿病学领域的应用，特别是其诊断和治疗[7]：

疾病分类：人工智能已经被应用于风湿病学领域的疾病分类，例如通过深度学习算法检测定义明确的放射学骶髂关节炎，取得了良好的性能。

炎症性关节炎的检测：人工智能也被应用于检测炎症性关节炎，例如通过MRI检测活动性炎症性骶髂关节炎，以及通过深度学习算法对RA和PsA进行分类。

关节炎的诊断和治疗：人工智能在关节炎的诊断和治疗方面也具有潜在的应用价值，例如通过深度学习算法对关节炎进行分类，以及通过多中心数据集进行独立算法测试，以评估模型的实际应用价值。

显然，人工智能在影像诊断辅助中的应用具有广泛的前景，可以帮助实现精准医疗，提高诊断和治疗的准确性和效率。值得一提的是，在影像诊断中，人工智能的深度学习算法被广泛应用：深度学习算法可以通过对医学影像数据进行分析，帮助医生更准确地诊断疾病，例如通过深度学习算法检测定义明确的放射学骶髂关节炎；深度学习算法可以通过对医学影像数据进行分割，帮助医生更准确地识别病变区域，还可以通过对医学影像数据进行配准，帮助医生更准确地比较不同时间点的医学影像数据，例如通过深度学习算法对脑部MRI图像进行分割和配准，以辅助诊断和治疗。深度学习算法还能通过对医学影像数据进行重建，帮助医生更准确地重建医学影像数据，例如通过深度学习算法对CT图像进行重建，以提高图像质量。

2023年6月的一次研究中还提出了一种基于连续深度学习优化和集成方法的精确医学诊断系统，在七种独立数据集上进行测试，诊断准确性超过了大多数医生。该系统可以扩展到其他器官的智能诊断，为人工智能诊断在精准医疗中的广泛应用奠定基础。研究比较了不同模型的诊断能力，选定了最优模型，CLS模型的平均诊断准确率超过了21位参与实验的医生中的95%。研究还发现，CLS模型的诊断能力与实验医生的诊断能力有很强的相关性。该研究比较了三种算法在同一数据集和训练方法下的诊断能力，发现不同算法的诊断效果存在差异。研究还基于多中心、多数据源的乳腺癌病历和图像，构建了一种用于诊断乳腺癌的优化模型，在诊断准确率和稳定性方面表现良好，具有较高的应用价值。研究者还介绍了一种基于深度学习的医学图像分类方法，为临床诊断提供了新的解决方案，并展示了人工智能在精准医疗中以及在医疗领域的广泛应用前景[8]。

同时，还有一些研究人员阐述了人工智能和纳米技术在精准医疗中的应用，包括癌症治疗、基因治疗和生物医学成像等。纳米技术在癌症诊断和治疗中具有广泛应用前景，如基于纳米颗粒的生物传感器、纳米载体用于寡核苷酸delivery等。人工智能的计算方法在纳米颗粒设计中具有重要作用，可预测纳米颗粒的性质、药物释放动力学等。这些研究成果为癌症诊断、治疗和精准医学带来了新的可能性[9]。

同样，也是nature的2023年的一篇文章中提出了一种新的人工智能与医疗合作的范式GMAI（通用医学人工智能）[10]。作为一种新型医学人工智能方法，GMAI可以在大型、多样化的数据集上自我监督训练，灵活地解释各种医学模式，并产生具有高级医学推理能力的输出。GMAI有望挑战当前医疗人工智能设备监管和验证的策略，并改变大型医疗数据集的收集实践。GMAI具有改善医疗实践和减少医生出错的潜力，但在安全部署中仍需解决关键挑战。此外，研究人员还汇总了2021年至2023年一系列与人工智能、自然语言处理和医学图像识别相关的研究成果，这些成果对于推动人工智能在精准医疗领域的应用具有重要意义。

上述内容都体现了人工智能在精准医疗的应用。实际上，在新冠疫情之后，就有研究者提出了精准公共卫生医疗的想法，旨在通过人工智能的大数据分析将精准医疗和公共卫生相结合。研究人员认为最近的进展和新兴技术导致了丰富多样的卫生数据集的爆炸式增长，这反过来又将精准医疗和公共卫生领域结合起来，并使它们融合为精准公共卫生。2019冠状病毒病大流行为精准公共卫生的进一步发展提供了挑战和机遇，新的工具和技术开始拓展传统公共卫生方法。随着大数据和相关数据处理、存储及分析技术的爆发，研究人员和机构在个人和群体层面上理解和改善健康的方式开始发生变化，关注个人的精准医疗和关注群体健康的公共卫生目标正达成联盟，探讨各种数据类型，以确定更多的用例和机会，这将逐渐弥合精准医疗和公共卫生之间的差距[11,12]。

早在新冠疫情期间，李兰娟院士便提出了利用人工智能来推动疫情防控的观点[13]：

发现和控制传染源：通过大数据和人工智能技术，可以追踪和分析与传染源接触的人员，包括冷链和物流；从而快速发现和控制传染源，采取相应的检测、隔离和控制措施，有效控制疫情的蔓延。

人员流动控制：借助健康码、红外线测温等应用，通过人工智能实现对人员流动的控制，包括追踪和监测人们的健康状况，加速各行各业的复工复产。

智能诊断和治疗：人工智能在医疗方面可以通过智能化的方法快速研发诊断试剂、设备和药物，提高疾病诊断的准确性和治疗的效果。同时，通过互联网大数据和远程互联网医疗，实现病人的远程会诊、远程讨论，使专家的技术能够在各地得到应用和推广。

国际合作与经验交流：在大规模传染病疫情期间，借助互联网技术与其他国家进行连线，分享中国的经验和技术，进行互相交流和借鉴，使得医疗合作和知识共享没有国界。

尽管当时这一观点并没有涉及到精准医疗，但现在却证明了人工智能的发展将进一步推动医疗的创新和改进，使得医疗更加精准、便捷和有效，对于精准公共医疗有着重要的作用。

2.2人工智能精准医疗面临的挑战

由被评为“世纪医生”的EricJ.Topol独自撰写的一篇nature中讨论了精准医学领域人工智能的应用现状和未来趋势。文章指出，人工智能在该领域已经取得了显著的成果，但仍面临诸多挑战，如偏见、隐私和安全性等问题。深度学习在医学图像分析领域的应用，如病理学、皮肤疾病和眼部疾病的诊断，取得了令人鼓舞的成果，但仍需要更多的研究来验证其可靠性和实用性。人工智能在医疗领域具有巨大潜力，可以应用于疾病预测、诊断辅助等多个方面，但需要克服挑战，如样本量较小、缺乏跨学科研究等。为了更好地推广人工智能在精准医疗的应用，需要开展更多的前瞻性真实世界研究，并加强统计方法和分析。总之，人工智能在这一领域的应用还有很大的发展空间，需要多学科合作，加强研究和发展[14,15,16]。

在一次与AI大师吴恩达的对话中，Topol博士表示当前人工智能与精准医疗的结合的瓶颈包括:缺少大型的、多样的、被标注的数据集;缺少前瞻性试验;缺少计算机与医生之间的深度合作;缺少落地,并且算法需要更多的监督,需要防止恶意干扰、攻击及软件中其他可能发生的故障;多维度的数据需要新的、混合的模型。吴恩达提出,深度学习在医疗中的广泛应用仍面临着三大瓶颈。一是数据量,深度学习往往在数据量大的时候表现得更出色,而对于只有少量病例可供机器学习的疾病(比如疝气),人工智能则往往无法达到人类专家的水准。二是稳健性(robustness)和普遍性(generalization),即一个在已发表的论文中被验证的模型,在临床中却可能出问题。假设医院设备不够先进,或者医护人员不够训练有素,那么人工智能的结果可能也不尽如人意。三是人工智能为医院的管理与工作流程带来的改变,人工智能必须解决如下问题:首先,包括医生、护士、医疗保险公司、医院管理者在内的工作人员,是否能够适应人工智能所带来的全新的工作流程;其次,患者的安全至关重要,要如何保证人工智能算法不会损害患者的健康? [17]

除了以上问题，还有研究者指出医疗大数据中患者数据隐私的法律和伦理挑战，应该重点关注患者隐私保护。文章指出在数据收集方面，应关注公平性和包容性，确保不同群体都能得到公平的待遇。在数据使用方面，应考虑个人数据授权和患者同意等事项，避免滥用和泄露患者隐私。文章还提出了患者在决定何种用途下应具有发言权的问题，并探讨了患者数据被泄露后的隐私伤害。文章讨论了健康隐私侵犯的两种反应：道义主义和后果主义，并强调未来的大数据隐私将取决于数据来源、数据所有者以及数据类型，以及从多个来源进行数据triangulation的重要性。作者认为，不能一概而论地认为隐私最大化是正确的方法，因为隐私保护不足和过度保护都会给患者带来伤害[18]。

发表于柳叶刀的一篇文章综述了2000年至2020年期间关于临床人工智能在医疗中应用和患者及公众态度的研究。研究共纳入23项研究，主要涉及医疗保健、放射学和皮肤科等领域。研究结果显示，患者和公众对临床人工智能的态度总体上是积极的，但存在一些保留和担忧。患者和公众希望证明人工智能的有效性并了解其具体应用。他们强烈倾向于在医疗过程中保留人类监督，并希望参与人工智能的开发和实施。此外，患者和公众认为人工智能可以提高准确性和效率，增加对医疗保健的访问和患者赋权，也有人考虑到人工智能存在的一些潜在的弱点和风险，例如人工智能自动化抗生素剂量使用和其完全取代某些科室的医生。总体而言，AI在医疗领域的应用仍需进一步的研究和探讨[19]。

2.3 人工智能精准医疗的前景和未来

文章《2030年的精准医疗》指出精准医疗承诺通过考虑基因、环境和生活方式的个体差异来改善健康。精准医疗在未来十年将继续改变关键领域的医疗：庞大的群体和数据集、人工智能（AI）、常规临床基因组学、表型学和环境，以及不同人群的回归价值。文章讨论了精准医学未来七个机会，以实现更平等的医疗保健。这包括使用健康数据云、全球基因组和健康联盟（GA4GH）、收集社会健康的数据、临床基因组学、机器学习方法、加强国际合作、提高生物多样性、改善数据可访问性和多样性。文章指出了未来人工智能随着临床数据的增长，包括图像、叙述和实时监测数据，以及分子技术（尤其是基因组学）和设备及可穿戴设备的可用性，人工智能将能够提供更详细的表型和环境数据，这些数据以前从未以这种规模可用；机器学习方法的应用可能导致新的疾病分类，通过基因组、表型和环境预测因子。 随着数据集的扩大，机器学习方法将能够提供新的疾病分类、治疗策略和筛查策略，从而显著改善人群健康[20]。

还有研究者提出了人工智能结合智能医疗机器人在未来精准医疗中使用的构想。研究者认为人工智能和机器人在医疗领域的未来发展前景广阔。随着技术的进步，医疗机器人将能够执行更复杂的任务，如自主进行诊断成像、远程手术、手术子任务或整个手术过程。此外，人工智能在康复设备和高级假肢中的应用可以提供精准且个性化的支持，并提高功能和移动性。未来，人工智能和机器人技术将带来更安全、更高效和更广泛可用的患者护理。同时，机器人能更好地检测、处理和应对手术现场的不可预测变化。此外，监管机构也将制定新的规定来监管这些具有自主实践能力的系统[21]。

也有研究人员设计了多模态生物医学AI的构架，尽管其在精准医疗中的应用依旧是通过大数据的分析和深度学习算法，但其数据处理方面却值得现在的人工智能在精准医疗中的应用学习和思考。多模态AI能做到在不侵犯个人隐私的情况下进行训练和部署：

技术措施：采用技术措施，例如差分隐私、联邦学习、同态加密和群智能等，确保数据安全和隐私;

模型训练：在训练模型时，采用数据脱敏、数据加密、数据分割、数据匿名化等技术措施，确保数据安全和隐私;

模型部署：在部署模型时，采用数据访问控制、数据使用协议、数据监管等技术措施，确保数据安全和隐私。

毫无疑问，这些方法为人工智能的未来处理数据涉及的隐私问题提供了很好的解决方法[22]。

上文提到面临挑战之一为缺乏跨学科的融合，在2019年发表在nature中的一篇文章就指出了人工智能在精准医疗的未来发展方向之一就是跨学科的融合[14]。实现人工智能在精准医疗的跨学科融合需要不同的努力：

建立跨学科团队：组建由计算机科学家、生物学家、化学家、物理学家等不同学科专家组成的跨学科团队，共同研究和开发人工智能在精准医疗的应用;

建立跨学科研究平台：建立跨学科研究平台，为不同学科的专家提供交流和合作的机会，促进不同学科之间的交叉融合和创新;

开展跨学科研究项目：开展跨学科研究项目，将不同学科的知识和技术应用于人工智能在医疗领域的应用，例如将生物学、化学、物理学等学科的知识和技术应用于医学图像分析、基因编辑、药物研发等领域;

加强跨学科人才培养：加强跨学科人才培养，培养具有跨学科知识和技能的人才，以满足人工智能在医疗领域的应用需求;

加强跨学科合作与交流：加强跨学科合作与交流，促进不同学科之间的交流和合作，共同推动人工智能在精准医疗的应用和发展。

需要注意的是，实现人工智能的跨学科融合需要克服不同学科之间的语言障碍、思维方式差异等问题，需要加强沟通和协作，以实现不同学科之间的有效融合和创新。同时，也需要加强监管和规范，确保人工智能在精准医疗的应用安全、可靠、有效。

3 总结

精准医疗是一种基于深度表型数据的过程，旨在为患者提供最精确的医疗护理。它包括多个反馈循环，需要不断努力变得更加精确。精准医疗的目的是通过临床和其他数据的整合，将患者分为新的亚组，从而实现更精确的治疗方案。精准医疗不是一种特定的治疗方法，而是一个不断发展的过程。在这一过程中，医疗工作者通过大数据整合多源信息，开发用于临床的模型，预测疾病进展和治疗响应。

人工智能在精准医疗中的应用和前景包括：

基因组学和分子生物学技术的发展，使得现代医学对患者的诊断、治疗、预后都有了更为精确的判断和选择。

人工智能可以通过深度学习和机器学习算法，帮助医生分析和解读基因组数据，确定遗传变异与疾病之间的关联以及预测患者的疾病风险。

精准医疗的研究治疗方法，对医疗健康领域也具有重要的意义，可以提高治疗效果、降低疾病发生率、优化医疗资源分配、推动医学研究发展等。

人工智能和纳米技术在精准医疗中的应用，包括癌症治疗、基因治疗和生物医学成像等。

然而人工智能在精准医疗的应用仍面临着一些瓶颈，包括缺少大型的、多样的、被标注的数据集，缺少前瞻性试验，缺少计算机与医生之间的深度合作，缺少临床的落地，并且算法需要更多的监督，需要防止恶意干扰、攻击及软件中其他可能发生的故障等。

展望未来，精准医疗和人工智能的结合将继续发展，推动医学领域的进步。跨学科的融合将成为未来精准医疗和人工智能发展的重要方向，包括建立跨学科团队、建立跨学科研究平台、开展跨学科研究项目、加强跨学科人才培养和加强跨学科合作与交流等。此外，人工智能在精准医疗的应用还需要解决一些关键挑战，包括数据量、稳健性、普遍性、人工智能为医院的管理与工作流程带来的改变等。在解决这些问题和挑战后，人工智能定能在精准医疗中为患者提供更加精确的医疗服务。

**参考文献**

[1] König IR, Fuchs O, Hansen G, et al. What is precision medicine? Eur Respir J 2017; 50: 1700391

[2] Pinho JRR. Precision Medicine. Einstein (Sao Paulo). 2017 Jan-Mar;15(1):VII-X.

[3] National Research Council. 2011. Toward Precision Medicine: Building a Knowledge Network for Biomedical Research and a New Taxonomy of Disease. Washington, DC: The National Academies Press.

[4] Wullich, B., Taubert, H., Goebell, P.J. et al. Individualisierte Präzisionsmedizin. Urologie 62, 879–888 (2023).

[5] Kar, A., Subash, A. & Rao, V. U. S. Reactive Artificial Intelligence Using Big Data in the Era of Precision Medicine. JAMA Surg 155, 671(2020)

[6] Loftus, T. J., Upchurch, G. R., Jr. & Bihorac, A. Reactive Artificial Intelligence Using Big Data in the Era of Precision Medicine-Reply. JAMA Surg 155, 671-672(2020)

[7] Minopoulou, I. et al. Imaging in inflammatory arthritis: progress towards precision medicine. Nat Rev Rheumatol 19, 650-665(2023)

[8] Li, J. et al. Towards precision medicine based on a continuous deep learning optimization and ensemble approach. NPJ Digit Med 6, 18(2023)

[9] Adir, O. et al. Integrating Artificial Intelligence and Nanotechnology for Precision Cancer Medicine. Adv Mater 32, e1901989(2020)

[10] Moor, M. et al. Foundation models for generalist medical artificial intelligence. Nature 616, 259-265(2023)

[11] Velmovitsky P E, Bevilacqua T, Alencar P, et al. Convergence of Precision Medicine and Public Health into Precision Public Health: Toward a Big Data Perspective[J]. Frontiers in Public Health, 2021, 9:561873.

[12] Khoury, M.J., Holt, K.E. The impact of genomics on precision public health: beyond the pandemic. Genome Med 13, 67 (2021)

[13] Dialogue with Li Lanjuan: artificial intelligence will "catch all" of the epidemic, making medical care more accurate.

[2020-11-23] https://mr.baidu.com/r/1buATPGhVUk?f=cp&u=3beb367137d62259 (in chinese)

对话李兰娟：人工智能将疫情“一网打尽”，让医疗更精准

[14] Topol, E. J. High-performance medicine: the convergence of human and artificial intelligence. Nat Med 25, 44-56 (2019).

[15] Rajpurkar, P., Chen, E., Banerjee, O. et al. AI in health and medicine. Nat Med 28, 31–38 (2022).

[16] Eric J. Topol,As artificial intelligence goes multimodal, medical applications multiply.Science381,eadk6139(2023).

[17]"Doctor of the Century" Eric Topol Talks with AI Master Wu Enda AI + Medical https://cloud.tencent.com/developer/news/625604 (in chinese)

“世纪医生”Eric Topol与AI大师吴恩达对话AI＋医疗

[18] Price, W. N., 2nd & Cohen, I. G. Privacy in the age of medical big data. Nat Med 25, 37-43 (2019).

[19] Young, A. T., Amara, D., Bhattacharya, A. & Wei, M. L. Patient and general public attitudes towards clinical artificial intelligence: a mixed methods systematic review. Lancet Digit Health 3, e599-e611 (2021).

[20] Denny, J. C. & Collins, F. S. Precision medicine in 2030-seven ways to transform healthcare. Cell 184, 1415-1419 (2021).

[21] Yip, M. et al. Artificial intelligence meets medical robotics. Science 381, 141-146, (2023).

[22] Acosta, J. N., Falcone, G. J., Rajpurkar, P. & Topol, E. J. Multimodal biomedical AI. Nat Med 28, 1773-1784 (2022).