



评述

现代医学发展4.0: 工业革命对医学发展的影响与启示

谭飞^{1,2}, 梅斌¹, 李露¹, 陈孝平^{1,3*}

1. 华中科技大学同济医学院附属同济医院外科学系, 武汉 430030

2. 华中科技大学教育科学研究院, 武汉 430074

3. 肝胆胰疾病湖北省重点实验室, 武汉 430030

* 联系人, E-mail: chenxpchenxp@163.com

收稿日期: 2025-01-26; 接受日期: 2025-04-17; 网络版发表日期: 2025-05-12

国家自然科学基金联合基金项目(批准号: U23A20483)、中国工程院院地合作项目(批准号: HB2024C20)和湖北省教学研究项目(批准号: 2022054)资助

摘要 本文深入探讨了人类历史上的四次工业革命对现代医学发展的深刻影响, 并对未来医学发展进行了展望. 文章详细阐述了前三次工业革命对医学进步的推动作用; 重点讨论了第四次工业革命与现代医学发展4.0的关系, 论述了现代医学发展4.0的六大主要特征; 从行业层面、国家层面、全球层面讨论了现代医学发展4.0时代面临的挑战并提出了应对建议; 最后对现代医学5.0的未来发展进行了展望. 文章强调要深刻把握科学技术所带来的机遇与挑战, 推动医学技术的创新与应用, 促进全人类的健康发展.

关键词 现代医学发展, 工业革命, 技术革命, 人工智能

在人类医学发展的漫长进程中, 从哲学基础、认知框架、方法论等角度, 可以将医学分为传统医学与现代医学. 传统医学(traditional medicine), 是在现代医学之前发展起来的多种医疗知识体系. 世界卫生组织对传统医学的定义是: 利用基于植物、矿物的药物, 精神疗法, 肢体疗法, 治疗、诊断和防止疾病或者维持健康的医学. 传统医学包括中国传统医学(中医)、印度传统医学、古希腊医学、古埃及医学等, 承载着各民族和国家的智慧, 对疾病的预防和治疗有独特的见解. 现代医学(modern medicine), 是传统医学的延续, 起源于西方国家18世纪的工业革命, 又称西医. 现代医学凭

借其不断革新的科学研究方法、严谨的实验科学体系以及对人体生理病理逐步深入的剖析, 构建起当今医学的主体架构. 20世纪60年代末至70年代初, 我国大力倡导中医、西医结合, 提出了“新医学”这一创新理念^[1].

本文将现代医学发展作为研究对象, 以工业革命为背景, 以科学技术演进为主线, 系统阐述现代医学从微观探索到智能跃升的整个发展历程, 深入剖析其不同历史阶段的核心突破与内在逻辑. 同时, 还将针对现代医学所面临的挑战, 提出批判性思考和应对策略, 旨在为理解未来医学的进步方向提供一个全面而深入的视角.

引用格式: 谭飞, 梅斌, 李露, 等. 现代医学发展4.0: 工业革命对医学发展的影响与启示. 中国科学: 生命科学, 2025, 55: 1464-1475

Tan F, Mei B, Li L, et al. Modern Medicine Development 4.0: the impact and inspiration of the industrial revolution on medical development (in Chinese).

Sci Sin Vitae, 2025, 55: 1464-1475, doi: 10.1360/SSV-2025-0019

1 四次工业革命概述

人类历史上的四次工业革命对全球社会、经济、文化和环境产生了深远的影响。学术界对于四次工业革命起止时间并没有形成一致的意见。美国学者罗纳·科图拉克(Ronald Kotulak)把18世纪末19世纪初的产业革命分为两次工业革命,把19世纪末到20世纪初的电力、化工和汽车的发展归为第三次工业革命^[2]。曾担任美国商务部副部长和代理部长的玛丽·古德(Mary L. Good)认为,第一次工业革命开始于18世纪晚期,第二次工业革命开始于19世纪40年代中期,第三次工业革命开始于19至20世纪之交^[3]。早在1984年我国就有学者提出,第一次工业革命开始于1735年,第二次工业革命发端于18世纪中叶,第三次工业革命起因于1820年奥斯特发现电流能使磁针偏转,第四次工业革命起源于20世纪80年代不同用途计算机的广泛使用^[4]。也有学者认为,工业1.0时期为1760~1860年,起源于英国;工业2.0时期为1870~1914年,实现电气化与自动化;工业3.0时期为20世纪末至21世纪初,称为数字革命年代;工业4.0时期为21世纪初至今^[5]。

我们认为,历次工业革命很难有一个非常准确的时间节点划分,全球各个国家和地区工业革命起始的时间是不一致的,但是历次工业革命的标志性事件却是公认的。据此,四次工业革命大体上可作如下划分。

第一次工业革命也称为蒸汽革命,大概发生在18世纪60年代到19世纪中期,起源于英国,以1764年珍妮纺织机的发明为标志,通过引入蒸汽机和纺织机等机械化生产方式,实现了从手工作坊向工厂生产的转变,标志着现代工业社会的开始。

第二次工业革命也称为电气革命,从19世纪中期到20世纪中期,以德国、美国为中心,以电力的广泛应用、化学工业的发展、内燃机的发明和汽车的普及以及电气化的推进为标志。

第三次工业革命也称为信息革命,从20世纪中期开始,至今仍在持续发展,以计算机、原子能、空间技术和生物工程的发明和应用为主要标志,开启了一个以信息化、自动化和技术密集为特征的新时代,促进了远程医疗、自动化医疗和个性化医疗的发展。

第四次工业革命也称为智能革命,从21世纪初一直持续到现在,核心在于智能化的发展与应用,通过云计算、大数据、人工智能、机器学习、物联网、机

器人技术、5G通信、生物技术等的运用,推动整个社会经济的深刻变革。

在宏观叙事层面,医学发展的阶段性特征与工业革命的技术浪潮存在显著协同。工业革命的技术突破为医学发展提供了工具和方法论,推动医学从宏观到微观、从经验到精准的演变,同时也带来了新的社会问题 and 挑战^[6]。我们将四次工业革命与现代医学1.0到4.0的发展阶段相对应,阐释工业革命对现代医学发展的推动作用,构建一个用于理解医学进步与技术革新相互作用的框架。

2 第一次工业革命与现代医学发展1.0

第一次工业革命不仅标志着人类生产力的一次巨大飞跃,也深刻影响了医学发展。医学从一门以经验和观察为主的科学逐步转变为一门实验性和分析性更强的科学。

(1) 疾病科学预防理论的建立。随着工业化进程的加快,大量人口向城市聚集带来了新的公共卫生挑战,医学界对公共卫生和预防医学的研究愈发重视。1796年,英国医生爱德华·詹纳(Edward Jenner)在人痘接种预防天花的基础上,改用更安全的牛痘接种,进而发明了世界上第一个天花疫苗,开启了人类预防疾病的新纪元^[7]。

(2) 细胞学说的建立。工业革命带来的机械加工技术,如钢铁铸造、精密齿轮制造等,显著提升了显微镜的精度。1830年,约瑟夫·杰克逊·李斯特(Joseph Jackson Lister)发明了消色差透镜,减少了光学畸变,使科学家能够更清晰地观察细胞结构。1838年,德国植物学家马蒂亚斯·雅各布·施莱登(Matthias Jakob Schleiden)在论文《植物发生论》中提出,所有植物组织的生长和发育均源于细胞的活动。1839年,德国动物学家西奥多·施旺(Theodor Schwann)在《关于动植物结构与生长一致性的显微研究》中提出,动物与植物一样由细胞组成。他们两人共同提出:细胞是生物体的基本结构单位,动植物在细胞层次上具有统一性,这就是著名的细胞学说(cell theory)。1855年,德国科学家鲁道夫·魏尔啸(Rudolf Virchow)提出“一切细胞来自细胞”,修正了施莱登和施旺认为新细胞“自由形成”的观念。细胞学说与进化论、能量守恒定律并称19世纪三大自然科学发现,为现代生物学奠定了基石。

(3) 细菌理论的提出与发展. 1861年, 法国科学家路易·巴斯德(Louis Pasteur)通过著名的曲颈瓶实验证实了空气中存在微生物, 后来提出了疾病的细菌理论^[8]. 随后, 德国细菌学家罗伯特·科赫(Robert Koch)发现霍乱弧菌、结核杆菌及炭疽杆菌等, 并改进了细菌培养方法和细菌染色方法. 他们在细菌学方面的研究, 明确了众多传染病的病原体, 极大推动了医学的进步.

(4) 加快了诊断学的进步. 18世纪后半叶, 奥地利医生约瑟夫·利奥波德·奥恩布鲁格(Josef Leopold Auenbrugger)创立叩诊法用以寻找病灶. 1816年, 法国医生雷奈克(René Laennec)发明了听诊器, 使医生能够通过听诊的方式来诊断心肺疾病, 标志着医学诊断方法的重大进步^[9]. 1851年, 德国眼科医生赫尔曼·冯·赫尔姆霍茨(Hermann von Helmholtz)发明检眼镜, 之后科学家相继发明了喉镜、食管镜、胃镜、膀胱镜、支气管镜等, 丰富了临床诊断方式, 并使体腔内治疗成为可能.

(5) 大量化学有机物开始应用于医学领域. 1831年塞缪尔·格思里(Samuel Guthrie)等科学家首次制备氯仿, 1832年德国化学家尤斯图斯·冯·李比希(Justus von Liebig)首次合成氯醛, 这两种化合物的合成为后来的麻醉和镇静治疗奠定了基础. 1846年, 美国医生威廉·T·G·莫顿(William T.G. Morton)首次在开放手术中使用乙醚进行麻醉. 这些化学有机物在医疗领域的使用, 使外科技术得到了快速发展^[10].

(6) 护理学成为独立学科. 1860年, 英国护士弗洛伦斯·南丁格尔(Florence Nightingale)创建了世界上第一所正规护士学校, 传播其护理学思想, 提高护理地位^[11]. 南丁格尔使护理从一种简单的生活照料行为逐渐转变为一门专业学科, 为现代护理学的发展奠定了坚实的基础.

(7) 对医学教育的促进. 第一次工业革命时期, 经济的繁荣带来社会财富增加, 使政府和私人机构有更多的资金投入医学教育中. 一些在工业革命之前已经成立的医学院校, 如爱丁堡医学院等, 凭借其雄厚基础, 借助工业革命带来的新技术, 不断革新教学内容与方法. 同时, 社会经济的发展带来医疗服务需求的增加, 一些新的医学教育机构在工业城市中涌现, 为更多人提供了接受医学教育的机会, 医学教育的受众范围从少数贵族或神职人员扩展到中产阶级, 从而

开启了教育普及化之路. 医学教育的内容得到了拓展与深化, 解剖学、生理学的进步使基础医学知识得到更新. 医院数量的增加以及环境设施的改善, 为医学实践教学提供了更好的条件, 学生可以在相对清洁、安全的环境中观察病人的治疗过程. 随着医学知识的积累和医疗设施的改善, 临床教学从传统的学徒式教学向更加系统的教学转变. 在此期间, 英国皇家医学会等学会组织, 也在定期开展学术交流, 促进医学知识传播与研究. 它们不仅推动了医学理论的进步, 还为医学教育提供了前沿知识与理念, 促进了医学教育水平的提升.

3 第二次工业革命与现代医学发展2.0

第二次工业革命期间, 医学技术特别是外科学技术取得突破性进展; 电力的普及使多种医疗设备得以被发明, 极大提升了疾病诊断治疗的效率和效果; 越来越多的抗生素和新药物被发现和应用, 让原本难以治疗的疾病得到有效控制; 现代医学教育模式基本确立.

(1) 无菌术原则的提出以及血型系统的发现促进了现代外科学发展. 在巴斯德证实微生物存在的基础上, 英国外科医生约瑟夫·李斯特(Joseph Lister)于1865年首次将石炭酸(苯酚)稀释溶液用于手术消毒, 随后提出了无菌术和抗菌术的原则, 开启了外科无菌技术的新纪元. 1886年, 德国外科医生恩斯特·冯·伯格曼(Ernst von Bergmann)采用热压消毒器对手术器械和敷料进行消毒, 让外科真正进入了无菌手术的时代^[12]. 1901年, 奥地利科学家卡尔·兰德斯坦纳(Karl Landsteiner)发现了ABO血型系统, 揭开了输血史上全新的一页^[13].

(2) 影像学和放射治疗学的突破带来诊断技术革命. 1895年德国物理学家威廉·康拉德·伦琴(Wilhelm Conrad Röntgen)发现X射线, 使医生可以通过影像观察到人体内部结构. 1898年, 皮埃尔·居里(Pierre Curie)和玛丽·居里(Marie Curie)夫妇二人发现放射性镭, 镭的放射性在肿瘤治疗中开始得到应用, 开启了放射治疗癌症之路, 也推动了核医学的诞生^[14]. 1904年, 科学家开始使用钡盐作为胃肠道造影剂, 使人体内部原本难以被观察的胃肠道能够在X射线的辅助下显影, 大大提高了诊断的准确性和疾病的早期发现率.

(3) 越来越多化学药物的发现与应用让疾病的治疗手段更加丰富。1921年,加拿大医生弗雷德里克·班廷(Frederick Banting)和他的助手查尔斯·贝斯特(Charles Best)发现了胰岛素,并成功用于治疗糖尿病。1928年,苏格兰细菌学家亚历山大·弗莱明(Alexander Fleming)发现青霉素,开启了抗生素治疗感染性疾病新时代^[15]。1936年,德国病理学家、细菌学家格哈德·多马克(Gerhard Domagk)发现磺胺类药物。1943年,加利福尼亚大学的塞尔曼·瓦克斯曼(Selman A. Waksman)和他的学生阿尔伯特·萨兹(Albert Schatz)发现了链霉素,为结核的治疗带来了新的希望,拓宽了抗生素的抗菌谱。

(4) 医学教育的全面变革与发展。随着工业化与城市化进程的推进,社会对医学人才的需求激增,许多国家纷纷建立新的医学院校或者扩大原有医学院校的规模。医学教育开始细分专业,内科和外科的分化更加明显。内科主要关注身体内部疾病的药物治疗,如传染病、心血管疾病等;外科则侧重于手术治疗,如外伤修复、器官切除等。不同的专业开始设置不同的课程和教学大纲,培养专业化医学人才。生理学、病理学、微生物学等基础医学学科的知识很快被纳入医学教育教学内容。临床教学越来越受到重视,医学生也获得了更多在教学医院参与诊疗工作的机会。同时,随着化学和物理学等学科的进步,医学实验教学得到了较大发展。医学院校开始建立实验室,配备先进的实验设备,医学生通过科学实验来验证所学理论知识。印刷技术的进步使医学教材的质量和数量得到了较大的提升。教材内容更加丰富、准确,大量的插图和图表被应用到教材中,极大地方便了学生理解复杂的医学知识。1910年,美国教育家亚伯拉罕·弗莱克斯纳(Abraham Flexner)发表了著名的弗莱克斯纳报告(Flexner Report)^[16],分析了当时美国医学教育面临的问题,提出了提高入学标准、标准化学制、重视临床教学等措施,不仅促进了美国医学教育质量的提升,而且对世界医学教育也产生了深远的影响。

4 第三次工业革命与现代医学发展3.0

第三次工业革命时期,疾病诊断技术取得重大突破;自动化技术提高了医疗服务的质量与效率;信息技术推动了远程医疗服务的发展;个性化医疗的进步

使得治疗方案更加精准;化学合成技术的进步促进了新药物的研发;生物-心理-社会医学模式改变了医疗服务和医学教育;医学教育现代化的步伐加快,教育理念、内容和方法不断创新。

(1) 电子技术的进步为疾病诊断技术带来质的飞跃。1972年,英国工程师戈弗雷·豪恩斯菲尔德(Godfrey Hounsfield)发明第一台商业化电子计算机断层扫描仪(CT)^[17]。随后,美国科学家保罗·劳特布尔(Paul C. Lauterbur)和英国科学家彼得·曼斯菲尔德(Peter Mansfield)在使用磁共振技术可视化不同结构方面做出了原创性的发现,促进了现代磁共振成像(MRI)技术的发展^[18]。这两项技术的问世,为医学诊断领域带来了革命性的飞跃,拓宽了医生的诊断手段,对人体内部结构的探查达到了前所未有的清晰度与精确度,并进一步推动了正电子发射断层扫描(PET)、单光子发射断层扫描(SPECT)等影像技术的发展,显著提升了疾病诊断的准确率。

(2) 自动化技术的应用提升了医疗质量与效率。20世纪70年代,美国外科医生阿彻·迪亚克(Arch Diack)等人,在弗兰克·潘特里奇(Frank Pantridge)第一台便携式心脏除颤器的基础上^[19],发明了自动体外除颤器(AED),在自动分析算法的帮助下,仅受过简单训练的人员便可实施早期电除颤,大幅提升心脏骤停病人的急救成功率。20世纪80年代,自动化药房系统的发明,减少了配药错误,提高了药品管理的安全性和效率。21世纪初,达芬奇手术系统等机器人辅助系统,提高了复杂微创手术的精确性和安全性。自动化技术的应用改善了疾病的治疗效果和病人的生活质量,同时也让医务人员有更多的时间和精力专注于更复杂的医疗工作。

(3) 微创技术取得了长足发展。1953年,瑞典医师斯文·伊瓦尔·塞丁格(Sven Ivar Seldinger)首创使用套管针、导丝和导管进行经皮穿刺股动脉插管的血管造影技术,奠定了现代介入放射学的基础。在影像设备的精准引导下,医生能够通过导管、导丝等器械,对病变部位进行精准治疗。1987年,法国医生菲利普·穆雷(Philippe Mouret)完成了世界上第一例电视腹腔镜胆囊切除术。此后,腔镜手术在普通外科领域迅速推广,腹腔镜阑尾切除术、胃切除术等相继开展。与传统手术相比,腔镜手术创伤更小、恢复更快,大大提升了病人的就医体验和康复质量。

(4) 信息技术极大促进了远程医疗的发展。20世纪60年代初,美国宇航局(NASA)和美国国防部高级研究计划局(DARPA)运用远程监护技术(telemonitoring)监测宇航员的健康状况,后来这一技术被应用于民用医疗领域,让病人在家中就能接受医疗监护。20世纪70年代,美国、加拿大和瑞典等国家的医疗机构发明了远程医疗咨询系统,通过电话和电子邮件等通信技术,为居家病人提供医疗咨询。信息技术的发展和应用,不仅提高了医疗服务的可及性和效率,还改善了病人的就医体验。

(5) 分子生物学技术推动个性化医疗的发展。随着基因组学、蛋白质组学等分子生物学技术的进步,医生能够根据病人的遗传信息提供更加个性化的治疗方案。1953年,美国生物学家詹姆斯·杜威·沃森(James Dewey Watson)和英国物理学家弗朗西斯·克里克(Francis Harry Compton Crick)发现DNA双螺旋结构,为分子生物学和遗传学研究奠定了基础^[20]。20世纪80年代,单克隆抗体技术的发展,为癌症和其他疾病的治疗提供了新方法。2003年,人类基因组计划完成了最终测序图谱,为个性化医疗和遗传学研究提供了重要资源。这些技术不仅让医生可以根据病人的基因图谱“量体裁衣”般制定精准治疗策略,还促使医疗产业链从药物研发、诊断试剂生产到临床治疗模式等各个环节持续革新。

(6) 科学家在药物研发领域的重大成果深刻改变了全球疾病治疗格局。20世纪50年代,法国科学家保罗·查恩(Paul Charpentier)合成了第一个抗精神病药物——氯丙嗪,促进了现代精神药理学的发展。1957年,美国科学家查尔斯·赫茨(Charles Heidelberger)合成氟尿嘧啶,作为治疗多种癌症的抗代谢药物。20世纪60年代,詹姆斯·布莱克(James Black)合成普萘洛尔,作为一种 β 受体阻滞剂用于治疗高血压、心绞痛和心律失常,被认为是20世纪临床医学和药理学最重要的贡献之一^[21]。1971年,我国科学家屠呦呦及其团队受到古代中医药文献的启发,开始研究青蒿。1972年,他们成功提取出了具有高效抗疟作用的青蒿素活性成分,为抗疟药物的研发提供了新的方向。1987年,齐多夫定获得美国食品药品监督管理局(FDA)批准上市,成为第一个获批用于治疗HIV/AIDS的抗逆转录病毒药物。2004年,多位科学家合作开发贝伐珠单抗,作为一种靶向疗法药物用于治疗多种类型的癌症,特别是转移性

结直肠癌。

(7) 生物-心理-社会医学模式(Biopsychosocial Medical Model)的提出。1977年,美国精神病学家乔治·恩格尔(George L.Engel)提出了著名的生物-心理-社会医学模式^[22]。它改变了传统医学观念,强调从整体出发看待健康与疾病,全面综合考虑生物、心理和社会因素,不再仅仅关注生物因素。提升了医疗服务质量,改善了医患关系;医学教育和研究也因此受益,促使教育模式改革,培养综合人才,拓展研究领域,鼓励跨学科合作;完善了疾病的预防策略,提升了预防效果,同时有利于合理分配医疗资源。

(8) 信息革命浪潮下医学教育的多维变革与创新发展。一是医学教育理念得到了进一步更新。跨学科教学理念被广泛接受,医学与众多其他学科交叉融合的趋势越发明显,例如,生物医学工程等涉及生物学、医学和工程学等多个学科领域的专业得到了快速发展;科技发展推动医学知识更新速度不断加快,新的疾病诊断技术和治疗方法以及药物研发成果不断涌现,终身学习的观念也越来越受到重视。二是教学内容的更新速度进一步加快。前沿技术知识不断融入医学教育教学,分子生物学和遗传学内容成为医学教育的核心组成部分,信息技术知识也被大量引入医学教育;随着科技进步,世界变成了“地球村”,全球健康问题也被纳入医学教育内容,全球公共卫生问题、环境与健康问题受到广泛关注。三是教学方法和手段不断推陈出新。在线教育平台蓬勃发展,为医学教育提供丰富的教学资源,临床技能模拟训练成为常态,虚拟教学得到广泛应用;基于问题的学习(PBL)和小组学习开始盛行,教师教学方法培训受到前所未有的重视。

5 第四次工业革命与现代医学发展4.0

5.1 现代医学发展4.0的概念

第四次工业革命以物联网、大数据、人工智能、机器学习、云计算等多种前沿技术深度融合为核心^[23]。在工业物联网的助力下,万物互联成为现实,设备间能高效通信协作;大数据分析则从海量数据中挖掘价值用于决策;人工智能赋予系统自主学习和优化能力;云计算提供强大的计算支持。

第四次工业革命推动了现代医学发展4.0——智能医学时代的出现和发展。日本厚生劳动省原官员、

医生加藤浩晃所著的《未来医疗: 医疗4.0引领第四次医疗产业变革》一书^[24], 从多个角度讲述了第四次工业革命的技术给医疗领域可能带来的变化, 展现了未来医疗的景象。

我们认为, 现代医学发展4.0是在第四次工业革命背景下, 医疗健康领域的一次深刻的革命。它将先进的科学技术融入医学, 实现了现代医学发展的数字化与智能化、精准化与个性化、远程化与移动化、融合化与协同化、可视化与沉浸化、安全化与高效化。现代医学发展4.0的到来, 标志着医学发展与工业发展的深度融合进入了一个新的发展阶段。

5.2 现代医学发展4.0的主要特征

现代医学发展4.0时代的核心特征可概括为以下方面。

(1) 数字化与智能化。一是大数据分析助力临床决策。通过收集和分析海量医疗健康数据, 为疾病诊断、治疗方案制定、疾病预测等提供更精准依据。在肿瘤学领域, 通过大数据分析病人的基因组数据和临床案例, 医生可以识别特定癌症亚型, 为病人提供更精准的靶向治疗方案。据报道, 中国平安医疗科技开发的“AskBob”AI医生系统, 通过对4000万医学文献、20万药品说明书、2万临床指南和大量经典案例的学习, 已经达到与国际知名医院专科医生相当的诊断水平。二是人工智能和机器学习开始广泛应用于医学领域。特别是在分析处理医学影像学图像方面, 通过训练模型识别图像中的异常形态, 可大幅提高医生诊断的准确性和效率。谷歌旗下DeepMind Health公司以及伦敦大学学院眼科研究所共同创建的人工智能系统, 在眼科OCT图像分析中, 对50种视网膜疾病的诊断准确率与顶级眼科专家水平相当。三是物联网助力医疗设备互联互通。通过物联网技术, 能够实时收集病人穿戴健康监测设备的各项生理数据, 自动传输到云端。医生可以远程访问这些数据, 实时监控病人的健康状况, 及时调整治疗方案。西北大学Rogers及苏黎世联邦理工Goldhahn等人在*Nature*发表研究成果, 他们将分子生物监测融入可穿戴传感器, 实时监测体液中的小分子和大分子, 如汗液、尿液、唾液等, 能够实现疾病的早期诊断、治疗效果评估及疾病进程追踪^[25]。

(2) 个性化与精准化。一是制定个性化治疗方案。根据病人个体差异, 如基因信息、病史、生活方式等,

制定个性化的诊疗方案。基因测序技术的应用使医生能够根据病人特定的遗传信息定制个性化治疗方案。美国Broad研究所David Liu实验室研发的“Prime Editing”(先导编辑)技术, 能够实现靶向插入、缺失及任意单碱基替换, 从而精准修复致病基因突变, 为单基因遗传病治疗提供了更安全高效的解决方案^[26]。二是实现精准诊断与治疗。借助基因检测、蛋白质组学等技术, 深入了解个体疾病风险和特征, 实现疾病的早期精准诊断。在癌症诊断中, 液体活检技术能检测血液里的肿瘤细胞DNA片段, 精准判断癌症类型、分期, 甚至追踪微小残留病变。精准诊断为后续精准治疗提供了有力支撑, 让治疗手段能够更高效地直击病灶, 最大程度提升治疗效果。华大基因的HPV分型检测技术, 基于领先的高通量测序平台, 可一次性检测出17种HPV分型, 大幅提升筛查准确率, 获得了国家药品监督管理局的医疗器械注册认证。

(3) 远程化与移动化。一是远程医疗服务得到极大拓展。基于信息技术的远程会诊及手术平台, 可以打破地域限制, 让病人通过视频问诊、远程监测设备等接受医疗咨询、诊断和治疗, 提高了医疗资源的可及性。2021年开始, 我国工业和信息化部联合国家卫生健康委员会组织开展了5G+医疗健康应用, 围绕远程诊断、远程治疗、远程重症监护(ICU)等重点方向, 开展智慧医疗健康设备和应用创新, 给病人带来极大便利。二是移动健康应用程序得到普及。病人利用移动设备上的健康应用程序, 随时随地记录和管理个人健康数据, 如运动、饮食、睡眠等, 还可与这些移动健康程序所提供的签约医生和医疗机构进行互动交流, 实现健康的自我管理。三是移动体检车、移动手术室等移动医疗设备的出现, 进一步丰富了移动化医疗的内涵。移动体检车配备了先进的设备, 能够深入社区、企业、偏远地区, 提供一站式健康体检服务。移动手术室内部设施齐全, 配备高标准的消毒系统和层流净化装置, 能够在各种复杂环境下开展手术。无论是在偏远山区应对突发疾病, 还是在灾害救援现场争分夺秒抢救生命, 移动手术室都能发挥关键作用, 为病人提供及时有效的手术治疗。

(4) 融合化与协同化。一是实现学科交叉融合。医学与物理学、化学、生物学、信息科学、材料科学等多学科深度交叉融合, 催生了生物医学工程、智能医学工程、医学信息工程、再生医学等新兴专业和学

科,为医学发展提供新的思路和方法。例如,脑机接口(brain-computer interface, BCI)研究项目,融合医学、神经科学、电子工程、计算机科学和材料科学等多学科知识,开发能够直接读取大脑信号并转化为控制指令的技术,从而帮助瘫痪病人通过大脑信号控制假肢等辅助装置。二是实现跨领域合作。高校、医疗机构、科研机构、企业、政府等各方加强合作,形成“政产学研”协同创新的良好生态,共同推动医学技术的研发、转化和应用。我国《“十四五”医药工业发展规划》、美国“抗癌登月计划”(Cancer Moonshot)等,都是政府主导、多方参与、跨领域合作的典型模式。

(5) 可视化与沉浸化。一是虚拟现实(VR)与增强现实(AR)技术的广泛应用。在临床治疗中可以辅助医生进行手术导航、康复训练等,为病人提供更直观、生动的医疗体验。据报道,美国约翰·霍普金斯医院使用AR图像引导完成了美国首例脊柱融合术。手术导航系统利用增强现实技术,将病人的三维医学影像(如CT, MRI)与手术视野实时叠加,使三维脊柱解剖结构可视化,为医生带来一种“X射线视角”。如今越来越多的大学也在利用VR解剖教学系统的虚拟现实技术创建高度逼真的三维人体解剖模型,让学生通过VR设备观察人体内部结构并进行虚拟解剖操作。二是3D打印技术的广泛应用。它可以根据病人个体差异,快速、精准地制造医疗器械、人体组织器官模型等,为医疗诊断、手术规划、个性化植入物制造等提供支持。荷兰乌得勒支大学医学中心(UMC Utrecht)是欧洲顶尖的医疗机构之一,该中心开发的3D打印手术规划系统能够根据病人的CT或MRI数据,快速制造出精准的解剖模型,显著提高了手术的精准度和效率,缩短了手术时间,减少了术后并发症。

(6) 安全化与高效化。一是基于区块链的医疗数据安全体系。通过构建去中心化存储架构,实现医疗数据全生命周期加密保护和权限管理,在确保病人隐私的同时,利用区块链不可篡改特性建立数据溯源机制,为医疗信息化发展提供防篡改、可审计的基础设施^[27]。病人可以设置自己的数据访问权限,医疗机构和医生只有在获得授权后才能访问相关数据。二是基于云计算的资源配置优化体系。云计算平台可以为医疗机构提供灵活的计算资源,支持医疗影像存储、数据分析和远程医疗服务。医疗机构可根据需求灵活调配计算资源,提高医疗服务的响应速度和运行效率,

同时降低成本,提高病人满意度。

6 现代医学发展4.0时代面临的挑战与应对策略

6.1 行业层面

6.1.1 医工交叉的深入推进

在医学的发展进程中,工业技术与医疗的交融一直是推动创新的重要力量^[28]。特别是在医学技术发展4.0的时代背景下,医工交叉成为了一个飞速发展的新领域。

这一领域的进步为医疗技术的发展带来了革命性的变革,推动了医疗器械设计、开发和制造革新^[29]。工程技术的创新应用,让新的医疗设备在功能性、可靠性、可用性、安全性和对病人友好性方面都有了显著提升。可穿戴设备、可降解植入物以及微创手术器械等,都是医工交叉深度发展的成果。在工程技术的加持下,基于数据的治疗策略成为可能,可以为病人提供更加精准、个性化的治疗方案。大数据分析、云计算和人工智能的广泛应用,帮助医生迅速从海量的医学数据中找到最适合病人的治疗方法,极大提高疾病治疗成功率。

医工交叉发展面临的挑战也是多方面的。一是技术的快速发展要求大量医学工程人才,这些人才必须具备持续学习的能力和适应性,以不断更新的知识 and 技能来应对新的技术挑战。高校应进一步优化医工复合型人才培养方案,如设立“医学+工程学”双学位项目,推行双导师制,由医学专家与工程专家联合指导;开设双学位课程,涵盖人工智能、医学影像、生物材料等多个学科方向;强化实践环节,要求学生在医院、企业完成规定时间的见习实习。同时,通过职业再教育提升现有医疗和工程技术人员跨学科能力。二是医工交叉的科技创新体系建设还不够完善。在政府层面,需进一步修订完善相关政策法规,特别要强化激励机制,搭建更加高效的合作平台,整合医疗机构、高校与企业资源,形成从基础研究到产业化的完整链条。三是医工交叉的研究成果转化为临床应用的速度和效率仍有待提高。这涉及成果评估、临床试验、注册审批等多个环节,应建立标准化的科创成果转化流程,优化创新医疗器械审批流程,缩短医疗器械研发周期,降低研发风险,推动创新成果快速落地。同时,建立知

知识产权共享机制, 促进技术成果的公平分配与应用。

6.1.2 医患关系的数字化转型

随着数字技术的快速发展, 医患之间的沟通方式也在发生巨大的变化。数字化转型已成为现代医疗领域的一个重要趋势, 它改变了医患间的互动模式, 促进了医疗系统效率和质量的提升。

数字技术的应用使医患沟通更加便捷和高效。电子病历系统(EMR)、电子健康记录(EPR)等系统的普及, 让医生可以快速获取病人的历史医疗记录, 病人也能通过移动应用程序方便快捷地访问个人健康档案。信息共享的便利性大大缩短了医疗流程中的信息获取时间, 提高了工作效率。

远程医疗技术的发展为医患关系的数字化转型搭建了新平台。远程视频会诊和手术等技术手段的广泛应用, 减少了地理位置对医疗服务的限制。2024年6月, 中国科学院院士张旭团队在意大利罗马参加欧洲腹腔镜和机器人手术挑战大会时, 通过国产远程手术机器人成功完成并演示了跨亚欧大陆“全球最远距离”远程前列腺癌根治手术。

数字化转型也给医患关系带来了新的挑战。一是积极应对AI工具对医患互动模式的重构。在临床中已有病人携带AI工具生成的诊断报告, 质疑医生治疗方案的现象。这种基于技术平权的信息对称化进程, 会导致病人对专业判断的不信任。尽管AI在常见病诊断中表现出较高的准确率, 但是“AI幻觉”、数据偏见以及缺乏临床动态观察能力等缺陷, 可能会引发医患认知冲突。医患关系正在从“权威-服从”模式向“协作-博弈”模式演变, 医生应该通过“技术理性+人文温度”的融合, 构建更具韧性的智能诊疗信任生态。二是通过技术提升病人对治疗过程的理解与参与。应设计病人友好的数字化交互界面, 将晦涩难懂的医学术语、检验报告数据转化为通俗易懂的可视化内容, 如以动画形式展示手术流程、用图表解读化验指标变化, 方便病人直观了解病情走向及对应治疗手段, 从而增强病人的理解与配合程度。三是让医务人员迅速掌握复杂的操作流程。随着数字化医疗设备不断涌现, 应该开发智能化培训工具, 利用虚拟现实(VR)与人工智能(AI)模拟临床场景, 设计简洁高效的培训教程, 帮助医护人员在繁忙工作之余快速掌握新仪器、新技术, 确保诊疗服务的流畅性。同时, 搭建动态学习平台, 根据

个人技能短板提供私人定制化的培训。四是确保技术的普及不会加剧医疗资源的不平等分配等问题。由于城乡差异以及不同经济区域之间基础设施建设方面的差距, 要思考如何避免因技术鸿沟造成医疗服务的两极分化, 保障全民平等享有优质医疗资源。政策层面可推动区域性数字医疗网络建设, 加强基层医疗机构的信息化基础设施建设, 确保偏远地区病人平等获取优质资源。

6.2 国家层面

6.2.1 政策环境与伦理风险

大数据技术的蓬勃兴起、人工智能领域的深度拓展以及物联网系统的广泛应用, 一方面极大提升了医疗服务的质量与效率, 另一方面也带来了新的政策与伦理挑战^[30]。

在政策环境方面, 如何平衡技术创新与病人权益, 保障医疗数据的安全与隐私, 是当前及未来政策制定者需要面对的重要问题。伴随着大数据技术在医疗健康领域的应用, 如何确保病人的个人健康信息不被滥用, 同时又能促进医疗数据的合理使用, 成为一个亟待解决的难题。应建立分级分类的医疗数据管理体系, 强化匿名化处理与访问权限控制, 通过立法明确数据滥用应承担的法律责任。

伦理风险的管理也成为医学技术创新中不可忽视的一环。例如, 基因编辑技术的应用可能触及到人类胚胎的基因操作, 这不仅涉及到更改人类基因组的伦理, 还可能关乎人类自然演化的控制等深层次问题^[31]。异种器官移植也面临诸多伦理风险问题。利用动物作为器官来源一直遭到动物权利活动家的反对; 异种移植的风险-效益考虑不仅着眼于病人自身, 还必须考虑对社会的潜在感染风险; 接受异种器官移植者对自己和他人以及公共健康都构成了一定的风险^[32]。对涉及人类遗传物质或高风险生物技术的研究应实施严格的前置审批与动态监管。

6.2.2 医疗卫生健康成本管理与可及性问题

在当前的医疗卫生健康环境中, 成本管理与提高服务可及性之间的矛盾越来越突出。随着新技术的引入和治疗方法的进步, 医疗成本不可避免地增加, 如何使这些先进的治疗方法被更广泛的人群以更为经济的方式所获取, 也是亟待解决的问题。

成本管理不仅可以降低医疗费用,更重要的是有助于优化资源配置。例如,通过采用更为精准的药物进行治疗,可以减少不必要的药物使用,不仅实现成本控制,还减少了药物毒副作用,提升了治疗效果。此外,利用大数据分析识别低效诊疗路径,优化检查与用药方案,实现智能化成本控制,可以减少不必要的医疗支出,从而有效降低医疗成本。

提高医疗服务的可及性一方面要求我们注重技术的创新,另一方面还要提升服务的覆盖人群范围。远程医疗让病人可以不受地理限制地获得专业的医疗咨询和诊疗服务,大大提高医疗服务的可及性。同时,远程医疗也面临着网络不稳定、信息安全等挑战,需要通过技术上的改进和政策方面的支持来规避。

医疗服务的可及性还与医疗健康保险的可承受性密切相关。我们需要制定合理的保险政策,使所有病人都能够负担得起必要的医疗服务,避免因经济原因导致不必要的健康风险。

6.2.3 医学技术革命对医学教育的要求

现代医学发展4.0将会给医学教育带来颠覆性的冲击。传统的医学教育模式、教学内容、教学方法、评价体系必须与时俱进。

虚拟现实与人工智能重塑教学模式。通过虚拟现实(VR)、增强现实(AR)、混合现实(MR)等技术构建高仿真临床场景,如模拟手术操作、急救演练等,实现情景式、沉浸式学习。同时,利用AI算法分析学习者行为数据,制定个性化学习路径并实时优化;将DeepSeek、ChatGPT等AI工具融入课程,训练学生与AI协同诊疗,自动识别学习薄弱环节并提供针对性指导。

跨学科知识体系的构建。医学教育要打破传统学科壁垒,实现医学与人工智能、数据科学、工程学等领域的深度融合。课程内容必须包括最新医疗技术和治疗方法,如精准医疗、人工智能辅助诊断、医学数据分析等。

智能医学时代岗位胜任力培养。能力培养从单一临床技能转向多维能力,包括AI辅助诊断、机器人手术等技术应用能力,批判性思维与创新能力,多学科协作的领导力与团队协作能力等。同时需加强医患沟通、伦理决策、社会健康公平等医学人文教育,弥补技术理性可能带来的情感疏离。

医学教育的评价体系也应与技术发展深度协同。

应构建智能化评估工具(如VR手术模拟评分系统),通过AI与大数据分析实时追踪医学生的临床操作路径与决策逻辑;融合形成性评价与终结性评价,形成覆盖知识、技能、人文素养的多维动态成长档案;借助大数据构建终身学习轨迹追踪系统,实现“院校教育-毕业后教育-继续教育”的全周期反馈。

6.3 全球层面

6.3.1 多国间医疗卫生政策与标准化的挑战

在全球化背景下,不同国家医疗卫生政策和标准化的差异性,为国际医疗服务的交流与合作带来了难题。如何在保证医疗安全和提升服务质量的同时,实现医疗制度和技术标准的国际对接,成为了一个新的问题。不仅涉及到技术层面的标准化,还包括数据保护、法律法规的协调以及人才培养等多方面的合作。

未来,随着技术的不断进步,医学领域的创新将不断涌现,这对多国间的医疗卫生政策与标准化提出了更高的要求。如何在全球范围内推动医疗卫生政策的协调与合作,建立更加高效、公平、可持续的医疗卫生体系,将是未来医学发展的重要方向之一。应通过区域性医学联盟搭建技术共享平台,推动新兴市场国家参与国际研发项目,缩小技术应用差距。

6.3.2 全球性公共卫生应急响应的智能化

在现代医学发展4.0背景下,全球性公共卫生应急响应的处理方式也面临智能化的转型,从而提高对突发公共卫生事件的快速反应能力和决策效率。

智能化的公共卫生应急响应系统通过对海量健康数据、疫情数据的实时收集与分析,能够及时发现异常模式,预测可能的疫情发展趋势,为制定防控策略提供科学依据。此外,智能化系统还能够实现对医疗资源的优化配置,确保在紧急情况下快速、准确地将医疗资源和专业人员调度到需要的地方。例如,利用大数据分析技术,可以在疫情初期就进行风险评估和预测,从而提前部署医疗资源和制定干预措施;人工智能和机器学习的应用,能够在处理大规模流行病学数据时提供辅助决策支持,提高诊断的准确性和治疗的个性化水平。

此外,远程医疗技术的发展也为公共卫生应急响应的智能化提供了重要技术支持。通过建立远程医疗网络,可以实现远程诊断、会诊、医疗指导等服务,

特别是在疫情等特殊时期,能够有效减少交叉感染的风险,保证病人能够及时得到专业的医疗服务。

7 展望

站在时代前沿,我们不禁思考:在第四次工业革命的持续推动下,现代医学发展将迈向何方,未来是否可能催生“工业革命5.0”与“现代医学发展5.0”的新对应关系?这一阶段的医学可能将突破传统边界,呈现以下场景。

7.1 人工智能与基因技术的深度融合

人工智能与基因技术的结合将有助于实现超早期疾病干预。例如,通过全基因组实时监测与AI预测模型,可在症状出现前识别疾病风险。基于人工智能的空间组学技术,可以发现与器官功能、胚胎发生、物种进化和疾病发病机制有关的各种生物学现象,实现单细胞分辨率下的基因表达动态追踪,以细胞分辨率创建人体的“谷歌地图”,为超早期疾病干预提供精准导航^[33]。同时,基于基因大数据分析以及深度学习的人工智能技术为破解罕见病难题提供了新的思路。随着生物信息工具的广泛使用,罕见病诊疗将逐步走向精准化,并在预测风险、精准诊断、药物研发等方面实现更高水平的发展^[34]。

7.2 量子技术在医学领域的广泛应用

量子技术基于量子力学原理,涉及量子计算、量子通信、量子传感等多个方向,虽然仍处于探索阶段,但是在医学领域展现出了巨大的潜力,有望为医学发展带来革命性的变化。在药物研发领域,量子计算利用量子比特(qubits)的叠加和纠缠特性,能够实现比传统计算机更高效的计算能力,可加速药物筛选与设计,提高研发效率^[35]。在医学成像领域,量子磁共振成像和量子光学成像技术,以高分辨率和灵敏度,实现快

速精准诊断。量子通信技术可以为远程医疗和医疗物联网设备间的数据传输提供安全保障。量子传感技术凭借高灵敏度,可精准检测生物标志物和生理信号,助力疾病的检测与早期诊断。

7.3 纳米技术助力生物学领域重大突破

纳米技术将突破传统医学的物理限制,实现体内精准药物递送,或检测超早期疾病标志物。2018年,中国国家纳米科学中心成功设计出一种DNA纳米折纸机器人,这种机器人能够携带药物精确地找到癌细胞的藏匿之处。2022年,中国科研人员成功构建出全球首个智能DNA纳米机器人模型,仅由100个左右的核苷酸构成,形状类似发夹,非常适合用于狭窄的人体循环系统的药物靶向递送^[36]。目前DNA纳米机器人的研究尚处于起步阶段,距离临床应用还有很长的路要走。有专家预言,纳米机器人在不久的将来不仅能杀死细胞,更能修复细胞,从而为人类永生开启新篇章。

随着科学技术的不断进步,除了以上提到的技术可能外,脑机接口与神经调控技术、生物3D打印与器官再生等都有可能成为现实。我们不仅见证了技术革命如何深刻影响医学的发展,更看到了科技与医学深度融合所带来的巨大潜力和挑战。每一次工业革命的技术突破都推动医学向更智能化、个性化、精准化的方向发展。同时,我们必须深入理解科技既是助力也是挑战的双刃剑属性。例如,基因编辑可能引发脱靶效应,需建立全球统一的监管框架;量子计算的超强算力若被滥用,可能威胁医疗数据安全。中国《新一代人工智能伦理规范》提出“可控可信”原则,要求“确保人工智能始终处于人类控制之下”^[37]。欧盟《人工智能法案》则规定高风险医疗AI需通过严格临床验证与透明度审查。我们应抓住这个时代带来的新机遇,同时准备好面对更多未知的挑战。只有这样,我们才能持续推动医学技术的进步,为人类卫生健康事业做出更大贡献。

参考文献

- 1 Chen X P. Some issues deserve consideration of current medical education in China (in Chinese). *Med Soc*, 2022, 35: 1–4 [陈孝平. 当今我国医学教育值得思考的几个问题. *医学与社会*, 2022, 35: 1–4]
- 2 Qian X S. Review the Fourth Industrial Revolution (in Chinese). *Sci Sci Manag S.&T.*, 1984, 5: 8–9 [钱学森. 评“第四次世界工业革命”. *科学与科学技术管理*, 1984, 5: 8–9]

- 3 Ronald K, Liao J F. Science and industry outlook on the Fourth Industrial Revolution (in Chinese). *Sci Sci Manag of S.&T.*, 1984, 4: 41–42 [罗纳·科图拉克, 廖吉甫. 科学和工业展望第四次工业革命. *科学学与科学技术管理*, 1984, 4: 41–42]
- 4 Zhu N R. The Fourth Industrial Revolution (in Chinese). *Shanghai Account*, 1984, 4: 47–48 [朱南如. 第四次工业革命. *上海会计*, 1984, 4: 47–48]
- 5 Liu Y Y, Lin W Q, Yang C G. From industrial revolution (Industry 1.0) to Surgery 4.0 (in Chinese). *Chin J Dig Surg*, 2020, 19: 919–924 [刘允怡, 林伟棋, 杨重光. 从工业革命(工业1.0)到外科4.0. *中华消化外科杂志*, 2020, 19: 919–924]
- 6 Jin B. The origin, course and trends of the World Industrial Revolution (in Chinese). *J PLA Nanjing Inst Polit*, 2015, 31: 41–49+140–141 [金碚. 世界工业革命的缘起、历程与趋势. *南京政治学院学报*, 2015, 31: 41–49+140–141]
- 7 Willis N J. Edward Jenner and the eradication of smallpox. *Scott Med J*, 1997, 42: 118–121
- 8 Smith K A. Louis Pasteur, the father of immunology? *Front Immun*, 2012, 3: 1–10
- 9 Fayssol A. René Laennec (1781–1826) and the invention of the stethoscope. *Am J Cardiol*, 2009, 104: 743–744
- 10 Li W H, Liu Y, Wang X Z. Philosophical thinking on present and future situations through the retrospect of western medicine history (in Chinese). *Negative*, 2018, 9: 4–8 [李文辉, 刘颖, Wang X Z. 西方医学简史回顾及其哲学思考. *医学争鸣*, 2018, 9: 4–8]
- 11 Beck D, Dossey B M. Remembering Nightingale in her turbulent times: introducing the Theory of Integral Nursing in our turbulent times. *Int Nurs Rev*, 2024, doi: 10.1111/inr.13064
- 12 Kyle R A, Shampo M A. Ernst von Bergmann: pioneer of aseptic methods. *Mayo Clin Proc*, 1987, 62: 222
- 13 Figl M, Pelinka L E. Karl Landsteiner, the discoverer of blood groups. *Resuscitation*, 2004, 63: 251–254
- 14 Abergel R, Aris J, Bolch W E, et al. The enduring legacy of Marie Curie: impacts of radium in 21st century radiological and medical sciences. *Int J Rad Biol*, 2022, 98: 267–275
- 15 Chhabra S, Taksande A B, Munjewar P. The penicillin pioneer: Alexander Fleming’s journey to a medical breakthrough. *Cureus*, 2024, 16: e65179
- 16 Ludmerer K M. Commentary: understanding the Flexner Report. *Academic Med*, 2010, 85: 193–196
- 17 Petrik V, Apok V, Britton J A, et al. Godfrey hounsfield and the dawn of computed tomography. *Neurosurgery*, 2006, 58: 780–787
- 18 Slavkovsky P, Uhliar R. The Nobel Prize in Physiology or Medicine in 2003 to Paul C. Lauterbur, Peter Mansfield for magnetic resonance imaging. *Bratisl Lek Listy*, 2004, 105: 245–249
- 19 Baskett P, Baskett T. Frank Pantridge, MC, CBE, MD, FRCP, 1916–2004. *Resuscitation*, 2005, 65: 7–9
- 20 Tan S Y, McCoy A N. James Dewey Watson (1928–): co-discoverer of the structure of DNA. *Singapore Med J*, 2020, 61: 507–508
- 21 Stapleton M P. Sir James Black and propranolol. The role of the basic sciences in the history of cardiovascular pharmacology. *Tex Heart Inst J*, 1997, 24: 336–342
- 22 Fava G A, Sonino N. From the lesson of George Engel to current knowledge: the biopsychosocial model 40 years later. *Psychother Psychosom*, 2017, 86: 257–259
- 23 Laurisz N, Ćwiklicki M, Żabiński M, et al. Co-creation in Health 4.0 as a new solution for a new era. *Healthcare*, 2023, 11: 363
- 24 Tang C. Medical 4.0: transformation in progress (in Chinese). *China Hosp CEO*, 2022, 18: 90 [唐超. 医疗4.0变革进行时. *中国医院院长*, 2022, 18: 90]
- 25 Brasier N, Wang J, Gao W, et al. Applied body-fluid analysis by wearable devices. *Nature*, 2024, 636: 57–68
- 26 Anzalone A V, Randolph P B, Davis J R, et al. Search-and-replace genome editing without double-strand breaks or donor DNA. *Nature*, 2019, 576: 149–157
- 27 Chen X, Cao F, Wang Q, et al. 2024 Chinese guideline on the construction and application of medical blockchain. *Intelligent Med*, 2024, 5: 73–83
- 28 Kang L, Wang S P. Present status, difficulties, and strategies for interdisciplinary development in medical disciplines in comprehensive universities in China (in Chinese). *J Shanghai Jiaotong Univ (Philos Soc Sci)*, 2024, 32: 88–98 [康力, 王甦平. 我国综合性大学医学学科交叉的现状、难点及策略研究. *上海交通大学学报(哲学社会科学版)*, 2024, 32: 88–98]
- 29 Li X L, Liu Z Y, Mo Z Y, et al. Human-computer interaction and innovative design in the development of medical equipment products (in Chinese). *Packag Eng*, 2023, 44: 65–76+14 [李晓玲, 刘子荧, 莫泽宇, 等. 医疗装备产品研发中的人机交互和创新设计. *包装工程*, 2023, 44: 65–76+14]
- 30 Arawi T, El Bachour J, El Khansa T. The Fourth Industrial Revolution: its impact on artificial intelligence and medicine in developing countries. *Asian Bioeth Rev*, 2024, 16: 513–526

- 31 Zheng Y S, Liu M. Risk communication: building legal system of human gene editing technology risk (in Chinese). *Acad Exchange*, 2022, 11: 51–63+191 [郑玉双, 刘默. 风险沟通: 人体基因编辑技术风险的法律制度构建. *学术交流*, 2022, 11: 51–63+191]
- 32 Sun S K, Yang S J, Wei H, et al. Application of xenotransplantation in clinical practice (in Chinese). *Organ Transplant*, 2024, 15: 200–206 [孙圣坤, 杨树军, 卫浩, 等. 走向临床的异种器官移植. *器官移植*, 2024, 15: 200–206]
- 33 Liu L, Chen A, Li Y, et al. Spatiotemporal omics for biology and medicine. *Cell*, 2024, 187: 4488–4519
- 34 Gao H, Hamp T, Ede J, et al. The landscape of tolerated genetic variation in humans and primates. *Science*, 2023, 380: eabn8153
- 35 Ghazi Vakili M, Gorgulla C, Snider J, et al. Quantum-computing-enhanced algorithm unveils potential KRAS inhibitors. *Nat Biotechnol*, 2025, doi: 10.1038/s41587-024-02526-3
- 36 Li S, Cheng Y, Qin M, et al. Intelligent and robust DNA robots capable of swarming into leakless nonlinear amplification in response to a trigger. *Nanoscale Horiz*, 2022, 7: 634–643
- 37 Ministry of Science and Technology of the People’s Republic of China. New generation of artificial intelligence ethics (in Chinese). (2021-09-26). https://www.most.gov.cn/kjbgz/202109/t20210926_177063.html [中华人民共和国科学技术部. 新一代人工智能伦理规范. (2021-09-26). https://www.most.gov.cn/kjbgz/202109/t20210926_177063.html]

Modern Medicine Development 4.0: the impact and inspiration of the industrial revolution on medical development

TAN Fei^{1,2}, MEI Bin¹, LI Lu¹ & CHEN XiaoPing^{1,3*}

¹ Department of Surgery, Tongji Hospital, Tongji Medical College, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430030, China

² School of Education, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China

³ Hubei Key Laboratory of Hepato-Pancreato-Biliary Diseases, Wuhan 430030, China

* Corresponding author, E-mail: chenxpchenxp@163.com

This study delves into the profound implications of humanity’s four industrial revolutions on the evolution of modern medicine, while projecting visionary insights into its future trajectory. Initially, it elaborates on the catalytic contributions of the first three industrial revolutions to medical advancements; subsequently, it scrutinizes the symbiotic relationship between the Fourth Industrial Revolution and the paradigm of Modern Medical Development 4.0, delineating its defining characteristics. The analysis then investigates challenges confronting the Modern Medical Development 4.0 era through tripartite lenses, followed by a prospective discourse on the conceptual framework of Modern Medical Development 5.0. The article underscores the necessity of strategically harnessing opportunities and mitigating risks inherent in scientific and technological progress, advocating for interdisciplinary innovation in medical technologies and their pragmatic deployment to foster equitable health outcomes across humanity.

Modern Medicine Development, industrial revolution, technological revolution, artificial intelligence

doi: [10.1360/SSV-2025-0019](https://doi.org/10.1360/SSV-2025-0019)