

DOI:10.61189/372109jgxbwf

· 专家述评 ·

从医学 GPT 到医学智能体: Argus 智能体联合 EIT 在 ARDS 床旁监测中的应用前景

俞 尧¹, 徐孟哲^{2,3}, 宋振举¹, 徐成喜³, 白春学^{4,5,6,7*}

1. 复旦大学附属中山医院急诊科, 上海 200032
2. 英国剑桥大学, 剑桥 CB2 1TN
3. 苏州健通医疗科技有限公司, 苏州 215300
4. 复旦大学附属中山医院呼吸与危重症医学科, 上海 200032
5. 上海市呼吸物联网医学工程技术研究中心, 上海 200032
6. 上海市呼吸病研究所, 上海 200032
7. 复旦大学附属中山医院 AI+肺癌防治中心, 上海 200032

[摘要] 急性呼吸窘迫综合征(acute respiratory distress syndrome, ARDS)是急危重症医学中常见、高病死率且肺内空间异质性显著的临床综合征,实验室检查、呼吸力学参数及传统影像学等静态指标难以连续识别其区域通气/灌注失衡的动态生理过程。电阻抗断层成像(electrical impedance tomography, EIT)虽具备无创、无辐射、床旁连续显示区域通气分布的优势,但单一模态仍难以完整呈现病情演变、治疗反应及预后变化。近年来,医学人工智能正由以语言生成为主的医学 GPT(生成式预训练 Transformer 模型)向具备多源感知、规则治理、可解释推理与人在环机制的医学智能体演进。复旦大学附属中山医院与苏州健通医疗科技有限公司联合研发的 Argus 智能体,已实现多源设备接入、ARDS 数据总览、EIT 连续视频及衍生指标展示、白盒提示与云端/本地报告链路,为时空多模态监测的临床落地提供了医学智能体范例。本文认为,Argus 智能体的价值不在于“自动给出答案”,而在于揭示区域差异、组织多源证据并支持可解释决策。将来,随着标准化采集、多中心研究与全生命周期治理的推进,Argus 智能体有望由“监测型数字孪生的基础框架”逐步演进为可信的 ARDS 监测型数字孪生。

[关键词] 医学 GPT; 医学智能体; 电阻抗断层成像; 急性呼吸窘迫综合征; 多模态监测; 数字孪生

[中图分类号] R 459.7 **[文献标志码]** A

From medical GPT to medical agents: application prospects of the argus agent combined with EIT in bedside monitoring of ARDS

Yu Yao¹, Xu Mengzhe^{2,3}, Song Zhenju¹, Xu Chengxi³, Bai Chunxue^{4,5,6,7*}

1. Department of Emergency Medicine, Zhongshan Hospital, Fudan University, Shanghai 200032, China
2. University of Cambridge, Cambridge CB2 1TN, United Kingdom
3. Suzhou Kaonter Medical Technology Co., Ltd., Suzhou 215300, Jiangsu, China
4. Department of Respiratory and Critical Care Medicine, Zhongshan Hospital, Fudan University, Shanghai 200032, China
5. Shanghai Respiratory IoT Medical Engineering Technology Research Center, Shanghai 200032, China
6. Shanghai Institute of Respiratory Diseases, Shanghai 200032, China
7. AI+Lung Cancer Prevention and Treatment Center, Zhongshan Hospital, Fudan University, Shanghai 200032, China

[Abstract] Acute respiratory distress syndrome (ARDS) is a common clinical syndrome associated with high mortality in critical care medicine, characterized by marked intrapulmonary spatial heterogeneity; static indices derived from laboratory tests, respiratory mechanics, and conventional imaging cannot continuously capture the dynamic physiological process of regional ventilation—

[收稿日期] 2026-07-25

[接受日期] 2026-09-18

[基金项目] 四大慢病重大专项(2024ZD0529300), 国家自然科学基金(82570143、82170110), 上海市科学技术委员会项目基金(20DZ2254400、21DZ2200600、20DZ2261200), 上海市市级科技重大专项(ZD2021CY001)和上海市临床重点专科建设项目(shslczdk02201). Supported by the Noncommunicable Chronic Diseases—National Science and Technology Major Project (2024ZD0529300), the National Natural Science Foundation of China (82570143 and 82170110), the Science and Technology Commission of Shanghai Municipality (20DZ2254400, 21DZ2200600, and 20DZ2261200), the Shanghai Municipal Science and Technology Major Project (ZD2021CY001), and the Shanghai Municipal Key Clinical Specialty (shslczdk02201).

[作者简介] 俞 尧, 硕士, 主治医师; E-mail: yu.yao3@zs-hospital.sh.cn

*通信作者(Corresponding author). 白春学, 博士, 主任医师、教授; E-mail: cxbai@fudan.edu.cn

perfusion mismatch. Although electrical impedance tomography (EIT) offers noninvasive, radiation-free, continuous bedside visualization of regional ventilation distribution, a single modality alone cannot fully reflect the dynamic evolution of disease treatment and prognosis. In recent years, medical artificial intelligence has been evolving from medical GPT (generative pre-trained transformer), which is centered on language generation, toward medical agents that integrate multisource perception, rule-based governance, interpretable reasoning, and human-in-the-loop mechanisms. The Argus agent, jointly developed by Zhongshan Hospital, Fudan University and Suzhou Kaonter Medical Technology Co., Ltd., has implemented multisource device connectivity, an ARDS overview dashboard, continuous EIT video and derived-index display, white-box alerts, and a cloud/local report pipeline, providing a medical-agent paradigm for the clinical implementation of spatiotemporal multimodal monitoring. Our analysis suggests that the value of the Argus agent lies not in 'giving automatic answers' but in revealing regional differences, organizing multisource evidence, and supporting explainable decisions. In the future, with the advancement of standardized acquisition, multicenter studies, and lifecycle governance, the Argus agent is expected to evolve from a 'foundational framework for a monitoring-oriented digital twin' into a trustworthy monitoring-oriented digital twin for ARDS.

[Key Words] medical GPT; medical agent; electrical impedance tomography; acute respiratory distress syndrome; multimodal monitoring; digital twin

ARDS 是一组以弥漫性肺泡损伤、肺血管通透性增加为特征,导致肺通气与换气功能严重障碍的临床综合征,是急危重症医学中常见、高病死率的疾病^[1]。ARDS 患者的肺部病变易受重力作用影响,呈现垂直梯度上的不均匀分布,具有显著的空间异质性;不同病因(如大叶性肺炎、间质性病变或肺泡病变)亦可导致通气区域分布不均,进而使机械通气时跨肺压出现区域性应力集中,并增加肺泡剪切伤。欧洲重症医学学会指南强调,应在肺保护性通气的基础上,根据病情严重程度、肺复张潜力、呼吸驱动及血流动力学状态实施个体化呼吸支持^[2]。

EIT 是一种无创、无辐射的临床成像工具,可用于床旁实时监测肺通气的分布^[3]。与传统的肺部影像监测相比,EIT 在 ARDS 监测中展现出独特优势:相较于电子计算机断层扫描(computed tomography, CT)——作为肺形态学评估的金标准,CT 可定量评估肺通气和肺不张的区域比例,评估 ARDS 患者对治疗的反应,但因存在转运难度而受到使用限制^[4];而肺部超声(lung ultrasound, LUS)评分虽能评估肺复张和肺水肿,但难以直接量化肺通气异质性及容积-压力动态变化,因此作为单一工具难以完成精细化机械通气参数设置^[5]。

然而,单模态 EIT 仍不足以完整阐释 ARDS 的复杂病理生理过程。一方面,EIT 图像易受电极接触、体位改变、胸廓形态、胸腔积液、心动伪影及重建算法等因素干扰;另一方面,同一幅区域通气图尚需结合呼吸机参数、血气、血流动力学及临床事件,方可转化为可操作的解释。与此同时,ICU 内监护仪、呼吸机、EIT 及血流动力学装置持续生成高频异构数据,但设备接口、采样频率、时间戳、患者标识与质量标志往往不一致,形成难以联动分析的

“数据孤岛”。

在此背景下,复旦大学附属中山医院与苏州健通医疗科技有限公司联合研发了 Argus 智能体。该智能体基于床旁医疗物联网(Internet of Medical Things, IoMT),接入 HT 血流动力学设备、EIT 及体成分设备,并兼容部分德尔格、迈瑞等监护仪与呼吸机,从而实现多源参数的统一采集与高频刷新。其面向 ARDS 病房的总览界面可集中呈现入组患者、呼吸与循环指标、设备网络状态及异常告警,并支持逐床参数联动。Argus 已将 EIT 展示由静态图像扩展为连续视频预览,并形成衍生指标展示、白盒规则提示、云端与本地 AI 评估报告以及设备专属智能体通路。由此,智能体既能获取生命体征随时间变化的“时序信息”,亦可引入肺内功能分布的“空间信息”,为构建 ARDS 时空多模态监测框架奠定基础。需要强调的是,现阶段该框架仍应定位于数据融合、趋势分析、描述性提示与临床研究支持,不能替代医师诊断,亦不应未经人工确认直接控制呼吸机或执行治疗。本文综述 Argus 联合 EIT 的技术架构、潜在应用、转化挑战与发展方向,以期智能体与床旁功能成像在急危重症医学中的规范融合提供参考。

1 ARDS 精准监测需求与 EIT 技术基础

1.1 从全局呼吸力学到区域通气表型

ARDS 机械通气的核心矛盾,在于维持气体交换与减轻附加肺损伤之间取得平衡。平台压、驱动压、机械功及呼吸系统顺应性等指标虽具重要参考价值,但均为胸壁与肺、开放区与塌陷区共同作用后的整体反映。EIT 可将单次呼吸的潮气阻抗变化映射至不同肺区,并借助腹侧-背侧、左侧-右侧或自定义感兴

趣区分析通气重新分布。动态区域肺应变研究提示,EIT衍生的区域变化与CT测得的区域变化具有一定对应关系,但二者并非等价,尤其在低通气区域应审慎解读^[6]。多中心RECRUIT研究^[7]则表明,ARDS患者的肺复张性存在显著个体差异,支持在全局呼吸力学评估之外补充区域功能评估。

1.2 PEEP滴定中的塌陷—过度膨胀平衡 2024年ICM杂志的系统评价^[8]提示,与常规方法相比,EIT引导的PEEP滴定可能改善呼吸系统顺应性、降低驱动压和机械功,但纳入研究异质性较高,且临床结局证据有限。2026年EITVent多中心试验^[9]随访纳入190例中重度ARDS患者,EIT组依据递减PEEP试验中塌陷—过度膨胀交叉点设定PEEP;结果显示,两组28天病死率、无呼吸机天数及其他主要临床结局均无显著差异,试验因无效趋势提前终止。预设亚组分析提示高肺复张性患者可能获益,但该结果属于假设生成。同期述评指出,未来EIT策略不宜频繁重复宽范围肺复张和递减试验,而应结合预先的肺复张性判断,在较窄且生理上合理的范围内进行目标化微调^[10]。因此,EIT更适合作为全局呼吸力学之外的区域生理信息补充,而不是自动生成唯一PEEP答案的工具。Argus若开展PEEP支持,应同时呈现EIT区域塌陷/过度膨胀趋势、驱动压、顺应性、血压、心率、血氧、心输出量及临床事件,并将医师确认作为必要环节。

1.3 自主呼吸、体位变化与动态异质性 在压力支持通气或部分自主呼吸状态下,呼吸肌用力既可能改善背侧通气,亦可能引起区域跨肺压过高、呼吸钟摆及患者自伤性肺损伤(P-SILI)。同步EIT与食管压的随机交叉研究提示,联合区域通气与跨肺压信息有助于观察不同PEEP对肺与膈肌保护的生理效应^[11]。然而,呼吸钟摆、区域延迟及通气不均匀性不能仅凭单一阈值判定其病理意义,尚需结合呼吸驱动、呼吸机辅助水平、镇静状态及波形同步性综合评估。俯卧位可改善通气/灌注匹配并减少肺应力不均,但个体响应与最佳持续时间存在差异。EIT能够连续观察俯卧前后腹背通气分布、呼气末肺阻抗及依赖区塌陷演变。已有研究^[12]发现,部分ARDS患者在不同俯卧周期之间仍存在依赖区塌陷的动态变化。因此,EIT可作为氧合与呼吸力学之外的响应监测工具,但不应据此单独决定俯卧位的启动或终止;其价值更在于与其他多源参数联合,形成动态、可解释的决策支持。

1.4 灌注相关信号与V/Q评估边界 EIT灌注研究主要沿两类路径展开:其一,通过高渗盐水等对比

剂在短暂呼吸暂停期间获取首过灌注图;其二,从连续EIT信号中分离心动相关搏动成分。前者对区域灌注的辨识通常更为清晰,但需静脉注射、呼吸暂停及标准化流程;后者虽可连续观察搏动相关阻抗变化,却易受心脏运动、肺血管顺应性及信号分离方法影响,不能简单等同于绝对肺血流。ARDS严重程度相关的病理生理标志与EIT测得的通气/灌注(V/Q)失调存在相关性^[13]。将通气图与灌注图结合可形成相对V/Q分布,并用于探索分流样、死腔样及匹配区域。然而,若忽略肺泡通气量与心输出量的绝对水平,EIT相对V/Q指标可能产生方向和幅度均显著的偏倚^[14-15]。不同灌注指示方法的结果亦不完全一致^[16];动物研究虽支持EIT识别ARDS进展中的区域灌注变化,但外推至临床定量仍需验证^[17]。因此,Argus现阶段宜将搏动法或对比剂法结果表述为“灌注相关阻抗分布”或“研究性相对V/Q信息”,并与心输出量、血压、血气和超声等证据交叉验证,而非直接等同于绝对肺血流或临床决策依据。

2 Argus智能体联合EIT的协同架构

2.1 感知层:床旁IoMT与多源数据汇聚 感知层已接入HT血流动力学设备、EIT及体成分设备,并可对接德尔格、迈瑞等品牌的部分监护仪与呼吸机。Argus在统一患者上下文中采集气道压力、潮气量、呼吸频率、PEEP、SpO₂、心率、血压、心输出量及心指数等数据。其核心不仅在于“能读到数据”,更在于建立设备身份、患者身份、参数名称、单位、采样频率、时间戳与质量标志之间的稳定映射。EIT可输出或展示通气图、潮气阻抗变化、呼气末肺阻抗、通气重心、整体不均匀性指数及区域通气延迟指数等信息;在具备合适的灌注功能参数时,还可显示灌注相关图像与信号质量指标。不同设备的采样频率可从每秒数值至高频波形不等。Argus已构建统一采集与刷新链路,用于跨设备时钟校准、连接中断、丢包、手工事件及参数来源的持续记录与验证,从而为上层多模态分析提供一致、可追溯的数据基础。

2.2 数据治理层:质量控制、标准化和可追溯性 EIT信号质量控制至少应覆盖电极接触、电极带位置、运动伪影、心动成分、基线漂移、体位切换及胸腔条件变化。呼吸机与监护仪数据则需处理单位差异、无效值、报警状态、设备重连及患者切换。所有衍生参数应保留算法版本、输入窗口、质量评分与计算时间,以保证每一个用于提示的数值均可追

溯至具体设备、患者及时间段。Argus 已实现面向 ARDS 查房与汇报的数据总览大屏,可显示入组患者数、核心呼吸与循环指标、网络状态、实时异常告警及逐床参数表。为避免将失联数据误认为当前状态,设备掉线或数据超过 120 s 未更新时,将其标记为陈旧数据并以灰色显示。EIT 可视化已由静态图升级为连续预览视频流,支持 15 s、30 s 和 60 s 观察窗口,并可调节清晰度与帧率。视频基于环形帧缓冲读取真实采集帧,不通过插值生成不存在的中间帧,以减少视觉连续性对临床判断的误导。俯卧位、床头角度改变、重新佩戴电极带或胸腔引流后,EIT 测量平面与信号背景可能改变,应启动新的分析分段并清楚标记,而非将前后数据直接拼接为连续趋势;这一原则同样适用于后续白盒规则与人工智能评估的输入管理。

2.3 特征与融合层:从并排显示到时空关联 Argus 可按呼吸周期、分钟级趋势与临床事件 3 个尺度组织数据。呼吸周期尺度用于分析通气分布、呼吸机波形及患者呼吸努力;分钟级尺度用于识别 EIT 指标、氧合与血流动力学的协同变化;事件尺度则围绕 PEEP 调整、肺复张、俯卧位、吸痰及镇静改变形成前后对照。数据总览、逐床参数联动、EIT 连续视频与多设备趋势共同构成从病区概览到逐级查看至单床参数的工作流。多模态融合并不等同于将所有数据输入单一黑箱模型。更稳妥的路径是:先以明确的生理规则建立候选解释,再由统计或机器学习模型识别复杂模式,并通过反事实或遮蔽分析揭示哪些数据推动了提示结果。EIT 与人工智能、可变通气及个体化呼吸支持的结合已成为重要研究方向,但临床应用仍受数据质量、外部验证与可解释性限制^[18];如何在真实 ICU 环境中构建可追溯、可验证的多模态融合路径,仍是亟待解决的核心问题。

2.4 智能体层:证据链、对抗复核与人在环 Argus 已形成以确定性规则为核心的白盒分析通路,相关规则可结合 EIT 空间异质性、应激评分、心率变异性,以及平均动脉压、总外周阻力指数与每搏量变异度等循环指标,形成描述性风险提示。Argus 允许 HT、EIT 和体成分设备分别进入相应的白盒分析面板,并已打通云端与本地 AI 评估报告的触发、生成与多格式导出链路。报告输出应保留数据来源、规则命中、回退路径及“描述性、非诊断”限制说明;设备分析通路用于参数下钻与即时整理,并不改变各设备的注册预期用途。

从目标架构看,Argus 可进一步按“监测智能体

—质量智能体—生理解释智能体—安全复核智能体”分工:监测智能体汇总变化;质量智能体判断数据是否可用;生理解释智能体生成候选机制;安全复核智能体寻找反例、越界措辞与证据缺口。人工智能在 ICU 中的价值包括高频数据处理、早期识别与工作流支持,但训练偏倚、数据漂移、报警疲劳、可解释性及责任边界仍是主要障碍^[19]。因此,Argus 的临床输出应坚持人在环:系统可以提示“背侧潮气阻抗占比持续下降,同时 SpO₂ 下降且驱动压升高”,但最终判断仍需由临床医师结合完整临床情境作出。

3 Argus 联合 EIT 在 ARDS 中的潜在应用

3.1 PEEP 调整与肺复张反应的多维评估 基于已实现的多设备采集、EIT 动态展示与报告链路,Argus 可在标准化 PEEP 试验中围绕每个阶段建立事件窗口,同步归集 EIT 区域塌陷/过度膨胀趋势、整体不均匀性指数、驱动压、顺应性、血压、心率、SpO₂ 及心输出量。系统的现有价值在于将分散于多台设备中的证据组织为可回溯的趋势与阶段性报告,而非代替医师选定 PEEP。2025 年 Yuan 等的个体化 PEEP 研究^[9,20]表明,EIT 个体化 PEEP 在生理指标方面具有合理性,但固定且范围较宽的 PEEP 滴定流程并未显示普遍的结局获益。

3.2 区域通气异质性和 VILI 风险趋势 Argus 可通过 15 s、30 s 或 60 s EIT 连续视频,联合整体不均匀性指数、通气重心及呼吸力学指标的动态趋势,观察肺内异质性的演变。当通气逐渐集中于小范围非依赖区、局部通气延迟扩大、驱动压或机械功上升时,可形成“区域应力集中风险增加”的研究性提示。环形帧缓冲仅回放真实采集帧,有助于避免插值画面造成的伪连续性;但该提示仍需结合潮气量、患者自主呼吸努力、咳嗽、吸痰及体位变化加以解释,以免将真实采集中的短暂伪影误判为病理恶化。相较于固定阈值,个体化基线与变化率可能更适合长期监测。系统可在电极状态稳定、体位一致的分析分段内建立患者自身参考区间,并在变化持续超过预设时间且获得至少两类独立证据支持时发出提示。这种多证据门控机制有望减少报警疲劳,但其灵敏度、特异度及临床净获益仍需前瞻性评价,这也是该框架从技术可行走向临床可信的关键环节。

3.3 俯卧位和其他体位治疗的响应监测 俯卧位前后,Argus 可借助既有报告链路生成时间对齐的通气分布、氧合、顺应性及循环指标对照,并通过连续

视频回看体位切换前后的区域变化,以辅助识别“氧合改善但区域过度膨胀增加”“背侧通气增加但循环受损”等复杂响应。对于清醒俯卧位、侧卧位或抬高床头等干预,亦可采用相同框架。EIT电极带在俯卧位及长时间监测中存在皮肤压伤风险,已有病例报告提示必须重视电极带下皮肤评估^[21]。Argus可将佩戴时长、体位与皮肤检查事件纳入护理提醒,但提醒频率及操作流程需与感染控制、压伤预防及设备说明书保持一致,这也提示智能体落地需与护理、感控及工程团队协同设计。

3.4 通气/灌注匹配与心肺相互作用研究 在具备合格灌注数据时,Argus可将相对通气与灌注相关分布与心输出量、血压、SpO₂、血气及呼吸机设置进行同步展示。潜在研究问题包括:吸入一氧化氮或体位改变后,低V/Q与高V/Q区域如何重新分布;PEEP升高是否在改善依赖区通气的同时减少区域灌注;右心负荷增加时,心动相关阻抗信号如何变化。此类分析必须区分“区域分布变化”与“绝对灌注量变化”。搏动信号的增减既可能源于血流改变,也可能受肺血管顺应性、心脏运动及滤波影响。除非采用经过验证的对比剂法或校准方法,并同步获得可靠的心输出量与肺泡通气数据,否则不宜给出绝对V/Q或精确分流、死腔结论;这也是当前EIT灌注研究从定性走向定量的主要瓶颈。

3.5 长程趋势、临床事件回溯与科研数据平台 ARDS治疗通常跨越数日。Argus可将EIT视频、图像及衍生参数组织为可追踪的时序特征,并与呼吸支持模式、药物、体位、液体管理及重要操作事件建立关联。数据总览支持从病区级患者与网络状态下钻至逐床参数;设备掉线或数据超过120 s未更新时标灰,有助于临床团队在回溯“某次氧合下降前30 min是否已出现背侧通气丢失”“俯卧后改善能否维持至复位后”等问题时识别数据空窗。云端与本地AI评估报告可一键触发,并按既有导出菜单生成多格式结果;HT、EIT和体成分设备可分别进入相应的白盒分析面板。上述能力有利于查房、阶段性总结与科研归档,但报告生成成功并不等于其解释正确或能改善临床决策。对科研而言,统一的数据字典、质量标志与事件标签有利于构建多中心ARDS时空数据库,支持表型发现、算法外部验证及真实世界研究。精准重症医学领域的多模态人工智能研究近年来快速增加,但现有文献仍普遍存在单中心、回顾性、标签异质性及临床实施不足等问题^[22]。Argus平台的首要价值应是形成高质量、可审计的数据基础,而非过早追求复杂模型;只有在数据质

量、外部验证与临床工作流适配得到解决后,多模态智能体才可能真正走向精准重症的常规实践。

4 从多模态监测到ARDS监测型数字孪生

患者数字孪生通常被描述为包含多维、患者特异信息并用于辅助决策的可视化数字表征。现有综述显示,绝大多数所谓患者数字孪生仍处于临床前阶段,且多数仅实现患者到数字模型的单向数据流;真正具备双向交互与闭环能力者比例较低^[23]。成人重症领域的数字孪生研究亦以回顾性数据、模拟及早期验证为主^[24]。

依此标准,Argus联合EIT现阶段更适合称为“监测型数字孪生的基础框架”,而非完整治疗型数字孪生。其数字表征包括区域肺通气、灌注相关信息、呼吸力学、氧合及循环状态;患者→模型的数据流可通过IoMT持续更新;模型→临床的反馈则限于可解释的趋势、风险提示及候选生理机制。治疗动作仍由临床医师决定,系统不直接改变设备参数。

5 临床转化面临的主要挑战

5.1 数据标准化与跨设备时间同步 Argus已完成多类自有设备及部分主流监护仪、呼吸机的接入,但跨厂商互操作性问题并未因此消除。不同型号在协议、参数命名、单位、采样频率及报警含义等方面仍可能不一致,网络延迟、设备时钟漂移及人工操作未标记亦会破坏时序关联。现有120 s陈旧标灰机制虽可提示明显的中断,后续仍需按参数风险与刷新周期细化阈值,并持续完善设备适配器、统一数据字典、主时钟校准、事件标记及断点识别机制,以支撑多中心、多品牌环境下的可靠时序融合。

5.2 模型幻觉、解释性与自动化偏倚 Argus已实现白盒规则引擎及云端/本地报告链路,但医学智能体仍可能生成无依据的数值或因果解释,临床人员亦可能因界面的权威感而过度信任提示。系统应继续强制数值溯源,禁止引用不存在的数据;将确定性规则、统计模型与语言生成层相互分离;提供规则命中、回退路径、支持证据、反对证据及不确定性;并设置程序化安全护栏与人工确认。医学智能体应定位于认知增强与流程支持,而非自主临床决策^[25];其输出必须可追溯、可质疑、可复核,最终责任仍由临床医师承担。

5.3 临床证据与终点选择 多设备接入、动态视频、白盒提示及报告链路虽已实现,仍不足以证明其临床有效性。Argus联合EIT的评价应分层开展:技术

层验证数据完整性、延迟、陈旧标记及视频真实性;分析层验证肺通气、灌注等指标的重复性、规则性能及报告一致性;临床 workflow 层评价报警负担、解释时间及医师采纳情况;临床结局层评价无呼吸机天数、ICU 住院时间、并发症及病死率。鉴于 EITVent 试验总体结果为中性^[9],未来研究应避免将单一“最佳 PEEP”作为核心假设,而应验证多模态、受约束且较少侵入的决策支持策略,并同步明确其在不同 ARDS 表型中的适用边界。

5.4 数据安全、伦理与医疗器械监管 ICU 数据属于高度敏感健康信息。系统需落实最小必要采集、去标识化、访问控制、传输与存储加密、操作审计、备份恢复及数据留存策略。若系统输出参与 ARDS 诊断、治疗选择或呼吸机参数建议,其医疗器械属性与风险等级将取决于预期用途及功能实质,不能仅凭“辅助参考”免责声明降低监管要求。算法版本更新、模型漂移及网络安全风险均应纳入全生命周期质量管理;同时,需在伦理审查、知情同意与监管沟通中明确其预期用途边界,避免“辅助参考”成为事实上的监管豁免。

6 发展趋势与研究方向

6.1 从设备连接转向可计算的时空生理组学 在多设备接入、逐床联动及连续 EIT 展示已实现的基础上,下一步重点并非继续增加并排显示的参数数量,而在于建立统一的时间轴、区域肺表型与事件语义。可按呼吸周期、肺区及治疗事件组织 EIT、波形、血流动力学与血气数据,进而形成可用于机制研究与模型训练的“时空生理组学”数据结构,并为后续多中心验证与表型发现奠定基础。

6.2 从黑箱模型转向可解释、可审计的医学智能体 现有白盒规则、回退留痕及设备专属智能体为可解释架构奠定了基础。后续医学智能体的输出仍应完整涵盖数据来源、分析窗口、算法版本、质量评分、规则命中、推理摘要及人工处置记录。模型性能除区分度外,尚应评价校准、亚组公平性、跨中心泛化、报警负担及决策曲线净获益。多模态大模型可承担信息整合与自然语言解释,但核心数值计算与安全门控应由确定性、可验证的模块完成;这一分工也是后续监管审评与临床验证中需明确界定的关键边界。

6.3 从单中心原型转向分阶段临床评价 建议采用“技术验证——静默前瞻观察——工作流影响研究——随机或集群随机研究”的递进路径:第一阶段验证数据完整性、时间同步及 EIT 指标重复性;第二

阶段使系统仅后台运行,评估提示性能而不干预治疗;第三阶段评价临床使用体验与决策一致性;最终阶段方研究患者重要结局。各阶段均应预设停止规则与安全审查,并在伦理审查与监管沟通中明确各阶段的预期用途边界,以确保研究推进始终以患者安全为前提。

6.4 从监测型数字孪生向受控模拟演进 当高质量纵向数据与外部验证模型积累后,Argus 可探索构建患者个体化的肺功能数字表征,并在数字空间模拟有限范围的 PEEP 或体位变化。早期模拟应仅用于研究与方案比较,且需明确可信区间及适用范围。只有在证明模型对真实生理反应具备稳定预测能力后,方可讨论更高级别的决策支持;自主闭环治疗不应作为近期目标。现阶段,Argus 更合理的定位,仍是可解释、可追溯、人在环的时空多模态监测与决策支持框架。

综上所述,从以语言生成为主的医学 GPT,到具备多源感知、规则治理、可解释推理与人在环机制的医学智能体,医学人工智能在重症监护中的演进已然起步;本文以 Argus 智能体为例,呈现了这一演进在 ARDS 床旁监测中的进展与边界。Argus 已实现多源设备接入、ARDS 总览与逐床联动、EIT 连续视频及衍生指标展示、白盒提示、云端/本地报告与设备专属智能体,为构建具有时间同步、质量控制、证据溯源及人在环机制的时空多模态监测框架提供了医学实践范例。未来 Argus 的发展重点应从“自动给出答案”转向“提高信息质量、揭示区域差异、组织多源证据与支持可解释决策”,并通过技术、分析、工作流及临床结局四级评价验证其临床净获益。在清晰的功能边界与全生命周期治理下,该框架有望逐步演进为可信的 ARDS 监测型数字孪生,为元宇宙医学在智慧重症中的落地提供可评价、可审计的技术路径。

伦理声明 无。

利益冲突 所有作者声明无利益冲突。

作者贡献 俞尧、徐孟哲:选题与撰写;宋振举、徐成喜:审核与优化;白春学:修改与定稿。

参考文献

- [1] Matthay M A, Arabi Y, Arroliga A C, et al. A new global definition of acute respiratory distress syndrome [J]. Am J Respir Crit Care Med, 2024, 209(1): 37-47.
- [2] Grasselli G, Calfee C S, Camporota L, et al. ESICM guidelines on acute respiratory distress syndrome: definition, phenotyping and respiratory support strategies [J]. Intensive Care Med,

- 2023, 49(7): 727–759.
- [3] Matthay M A, Zemans R L, Zimmerman G A, et al. Acute respiratory distress syndrome [J]. *Nat Rev Dis Primers*, 2019, 5: 18.
- [4] Bitker L, Talmor D, Richard J C. Imaging the acute respiratory distress syndrome: past, present and future [J]. *Intensive Care Med*, 2022, 48(8): 995–1008.
- [5] Bouhemad B, Brisson H, Le-Guen M, et al. Bedside ultrasound assessment of positive end-expiratory pressure-induced lung recruitment [J]. *Am J Respir Crit Care Med*, 2011, 183(3): 341–347.
- [6] Brito R, Morais C C A, Lazo M T, et al. Dynamic relative regional lung strain estimated by computed tomography and electrical impedance tomography in ARDS patients [J]. *Crit Care*, 2023, 27(1): 457.
- [7] Jonkman A H, Alcalá G C, Pavlovsky B, et al. Lung recruitment assessed by electrical impedance tomography (RECRUIT): a multicenter study of COVID-19 acute respiratory distress syndrome [J]. *Am J Respir Crit Care Med*, 2023, 208(1): 25–38.
- [8] Songsangvorn N, Xu Y H, Lu C, et al. Electrical impedance tomography-guided positive end-expiratory pressure titration in ARDS: a systematic review and meta-analysis [J]. *Intensive Care Med*, 2024, 50(5): 617–631.
- [9] Yuan X, Zhong M, Li Z, et al. Electrical impedance tomography-guided positive end-expiratory pressure and mortality of patients with the acute respiratory distress syndrome: the EITVent randomized clinical trial [J]. *Am J Respir Crit Care Med*, 2026, 212(3): 440–451.
- [10] Becher T, Costa E. Rethinking electrical impedance tomography-guided positive end-expiratory pressure in acute respiratory distress syndrome: how much titration is too much? [J]. *Am J Respir Crit Care Med*, 2026, 212(3): 392–394.
- [11] Mauri T, Grieco D L, Spinelli E, et al. Personalized positive end-expiratory pressure in spontaneously breathing patients with acute respiratory distress syndrome by simultaneous electrical impedance tomography and transpulmonary pressure monitoring: a randomized crossover trial [J]. *Intensive Care Med*, 2024, 50(12): 2125–2137.
- [12] Pupier T, Gallo É, Bonnardel E, et al. Daily evolution of lung dependent-area collapse between prone position sessions in ARDS evaluated by electrical impedance tomography [J]. *Respir Care*, 2024, 69(4): 470–473.
- [13] Spinelli E, Perez J, Chiavieri V, et al. Pathophysiological markers of acute respiratory distress syndrome severity are correlated with ventilation-perfusion mismatch measured by electrical impedance tomography [J]. *Crit Care Med*, 2025, 53(1): e42–e53.
- [14] Leali M, Marongiu I, Spinelli E, et al. Absolute values of regional ventilation-perfusion mismatch in patients with ARDS monitored by electrical impedance tomography and the role of dead space and shunt compensation [J]. *Crit Care*, 2024, 28(1): 241.
- [15] Tuffet S, Maraffi T, Lacheny M, et al. Impact of cardiac output and alveolar ventilation in estimating ventilation/perfusion mismatch in ARDS using electrical impedance tomography [J]. *Crit Care*, 2023, 27(1): 176.
- [16] Gaulton T G, Martin K, Xin Y, et al. Regional lung perfusion using different indicators in electrical impedance tomography [J]. *J Appl Physiol* (1985), 2023, 135(3): 500–507.
- [17] Martin K T, Xin Y, Gaulton T G, et al. Electrical impedance tomography identifies evolution of regional perfusion in a porcine model of acute respiratory distress syndrome [J]. *Anesthesiology*, 2023, 139(6): 815–826.
- [18] Cappellini I, Campagnola L, Consales G. Electrical impedance tomography, artificial intelligence, and variable ventilation: transforming respiratory monitoring and treatment in critical care [J]. *J Pers Med*, 2024, 14(7): 677.
- [19] Pinsky M R, Bedoya A, Bihorac A, et al. Use of artificial intelligence in critical care: opportunities and obstacles [J]. *Crit Care*, 2024, 28(1): 113.
- [20] Yuan X, Chen D, Chao Y, et al. Effect of individualized positive end-expiratory pressure titrated by electrical impedance tomography in patients with acute respiratory distress syndrome [J]. *Am J Respir Crit Care Med*, 2025, 211(3): 418–421.
- [21] Hasegawa T, Yoshida K, Hakozaki T, et al. Severe pressure ulcer caused by an electrode belt for monitoring electrical impedance tomography in two patients in the prone position [J]. *JA Clin Rep*, 2023, 9(1): 82.
- [22] Yang M C, Shi N, Chen H, et al. Multimodal artificial intelligence for precision critical care: a scoping review [J]. *Health Data Sci*, 2026, 6: 0356.
- [23] Drummond D, Gonsard A. Definitions and characteristics of patient digital twins being developed for clinical use: scoping review [J]. *J Med Internet Res*, 2024, 26: e58504.
- [24] Kim Y, Kim J, Kim Y, et al. Digital twin applications in adult critical care: a scoping review of current development and implementation trends [J]. *Digit Health*, 2026, 12: 20552076261438961.
- [25] 白春学. 医学GPT研发的挑战与解决方案 [J]. *元宇宙医学*, 2026, 3(1): 11–15.

引用本文

俞尧, 徐孟哲, 宋振举, 等. 从医学GPT到医学智能体: Argus智能体联合EIT在ARDS床旁监测中的应用前景 [J]. *元宇宙医学*, 2026, 3(3): 152–158.

Yu Y, Xu M Z, Song Z J, et al. From medical GPT to medical agents: application prospects of the argus agent combined with EIT in bedside monitoring of ARDS [J]. *Metaverse Med*, 2026, 3(3): 152–158.