

基因组学、神经影像学与机器学习在癫痫精准治疗中的研究进展与应用整合

孙梦阳¹, 王艳玲^{2*}

1. 承德医学院, 河北 承德 067000

2. 沧州市人民医院, 河北 沧州 061000

DOI:10.61369/MRP.2025100022

摘要 : 癫痫是一种复杂的慢性神经系统疾病, 其传统诊疗模式在病因诊断与治疗策略上面临挑战。随着基因组学、神经影像学及机器学习等技术的发展, 癫痫的精准治疗已成为研究前沿。多模态数据整合能系统揭示癫痫从基因到表型的完整病理生理过程, 为实现精准诊断、预后预测及动态治疗奠定基础。本文通过回顾国内外相关文献, 分别阐述上述三项技术在癫痫精准治疗中的最新应用及整合策略, 探讨其构建个体化治疗体系的潜力与路径。

关键词 : 癫痫; 精准治疗; 多模态数据整合; 机器学习

Advances and Integration of Genomics, Neuroimaging, and Machine Learning in the Precision Therapy of Epilepsy

Sun Mengyang¹, Wang Yanling^{2*}

1. Chengde Medical University, Chengde, Hebei 067000

2. Cangzhou People's Hospital, Cangzhou, Hebei 061000

Abstract : Epilepsy is a complex chronic neurological disorder, whose conventional diagnostic and therapeutic paradigms face challenges in etiological identification and treatment strategizing. With the advancement of technologies such as genomics, neuroimaging, and machine learning, precision therapy for epilepsy has emerged as a research frontier. The integration of multi-modal data holds the potential to systematically elucidate the comprehensive pathophysiological process of epilepsy, from genetic determinants to clinical phenotypes, thereby laying the groundwork for precise diagnosis, prognosis prediction, and dynamic treatment adjustment. By reviewing relevant domestic and international literature, this article elaborates on the latest applications and integrative strategies of the aforementioned three technologies in the precision treatment of epilepsy, and discusses their potential and pathways for constructing individualized therapeutic frameworks.

Keywords : epilepsy; precision therapy; multimodal data fusion; multimodal data fusion

引言

癫痫是一种由脑部神经元反复异常放电构成的慢性神经系统疾病, 临床上具有发作性、短暂性、重复性和刻板性的特点。据 WHO 统计, 全球每年新发病例高达 500 万^[1]。但由于其致病机制复杂, 仍有约半数患者病因不明。近年来, 癫痫诊疗模式逐步突破传统框架, 精准治疗理念与新兴技术成为研究热点。其中, 基因组学技术可识别致病基因与遗传易感性, 为病因诊断提供分子依据^[2]; 多模态神经影像能够精确定位致病灶, 辅助手术规划与靶点选择^[3]; 机器学习通过整合多源临床数据, 实现发作类型智能分类、预后评估及个体化治疗策略生成, 显著提升诊疗精准性与效率^[4]。

尽管当前基于精准治疗理念和新兴技术的癫痫诊疗研究已取得显著进展, 但多数研究仍集中于基因组学、多模态神经影像或机器学习等单一领域, 缺乏多中心、多模态数据的整合分析。本综述拟整合近年研究成果, 探讨三者深度融合的创新治疗策略, 为突破癫痫治疗困境提供新理论视角。

作者简介: 孙梦阳 (1999.09-), 女, 汉族, 河北省沧州市人, 硕士研究生在读, 主要从事脑血管病方向研究。

通讯作者: 王艳玲, 沧州市人民医院。

一、基因组学在癫痫精准治疗中的应用与挑战

（一）基因组学技术的概述

基因组学是以整体视角探究基因组的结构、功能、表达调控及与疾病关联的交叉学科。近年来，高通量测序技术的快速发展使基因组学研究从单基因、局部序列分析快速扩展为全基因组、高分辨率、大规模解析^[5]。其中，全基因组测序（WGS）、全外显子组测序（WES）、转录组测序（RNA-seq）等技术在不同类型癫痫综合征中的应用已成为国内外大量学者的研究热点。

（二）癫痫相关基因的研究进展

SCN1A 基因为全面性癫痫伴热性惊厥附加症、Dravet 综合征的传统致病基因。不同类型的 SCN1A 变异通过不同机制致病，且与表型严重程度密切相关^[6]。WGS 技术可覆盖全基因组范围，高效检测所有类型的 SCN1A 变异，在癫痫中的综合诊断率可达 48%^[7]，在基因型-表型关联研究中发挥关键作用^[8]。WES 技术则通过靶向测序所有外显子区域，有效获取与疾病相关的突变信息。

基于 WES 技术，许多的新型致病基因得以发现。例如，CSMD1 是发育性癫痫性脑病及全面性癫痫的新型致病基因，其表达水平与发病年龄相关^[9]；EP400 为儿童神经发育障碍合并癫痫的新型致病基因^[10]；SLA25A22 则为潜在癫痫致病基因^[11]。

然而，同一癫痫表型并非由单一基因变异导致，而是多种遗传缺陷经特定信号通路传导引发神经网络功能紊乱的级联过程。SCN1A、KCNQ2 等功能丧失型突变及 CACNA1H 功能获得型突变，虽作用离子通道靶点不同，但均致神经网络兴奋/抑制（E/I）失衡、发作阈值降低，诱发癫痫^[12]。与离子通道型基因突变不同，TSC1/2、MTOR 等上游基因变异可激活 mTOR 通路，使脑皮质发育畸形、功能亢进神经元生成，形成低发作阈值脑组织^[13]。基因组学研究整合上述变异信息，既阐明不同通路变异致相似表型的机制，也为通路靶向药物研究^[14]提供依据。

（三）基因组学技术与个体化治疗的关系

基因表达校正与多靶点干预为癫痫未来治疗新方向。反义寡核苷酸（ASOs）可在 mRNA 水平调节基因表达，通过剪接调节、掩盖 mRNA 影响翻译、靶向降解 RNA 等方式实现等位基因特异性调控，进而特异性调控发育性癫痫性脑病^[15]。此外，通过病毒载体将正常的基因拷贝递送到大脑中以补偿缺陷基因功能的基因增补治疗也被证实 Dravet 综合征的治疗中有效^[16]。

随着 CRISPR 工具箱扩展及 Cas 蛋白的发现，CRISPR 基因编辑技术在难治性癫痫的治疗中潜力显著^[17-18]。先导/碱基编辑器无需 DNA 双链断裂（DSB）即可实现碱基/小片段替换，安全性更高。已有研究用其修复小鼠 SCN1A 点突变，证实了其在 Dravet 综合征中的治疗潜力^[19]。针对难以直接替换的突变，可通过腺病毒（AAV）递送 CRISPR-Cas9 激活系统（CRISPRa）以上调 KCNA1 表达、降低神经元兴奋性，减少颞叶癫痫模型发

作^[20]。

基因组学为抗癫痫药物（AEDs）个体化选择提供重要依据，通过分析基因突变对离子通道、酶或药物靶点功能的影响，精准预测药物反应性。有研究表示，携带 CACNA1H rs3751664 TT 基因型或 CACNA1C rs1051375 AA 基因型者对丙戊酸耐药风险较高^[21]。HLA-B1502 等位基因与 AEDs 致皮肤不良反应相关^[22-23]。HLA-B5301 等位基因为非裔美国人苯妥英钠致肝损伤的致病基因^[24]。

二、神经影像学在癫痫精准治疗中的应用与挑战

（一）神经影像学技术的进展

1. 磁共振成像（MRI）

目前，我国已批准 7.0T MR 扫描仪进入临床应用。超高场强设备凭高信噪比与空间分辨率，可解析大脑皮层毫米级以下细微结构^[25]。且功能性磁共振成像（fMRI）研究焦点已从静态网络转向动态功能连接，为疾病机制研究提供了新方向^[26]。

弥散张量成像（DTI）为弥散加权成像的高级形式，其测量水分子弥散方向与程度，评估白质纤维束的微观结构完整性及其走向^[27]。DTI 技术的应用推动研究焦点从脑区转向脑网络，为理解脑信息传输架构奠定了基础。

2. 正电子发射断层扫描（PET）与单光子发射计算机断层扫描（SPECT）

PET 通过注射放射性核素标记示踪剂，检测脑局部分子代谢率以反映神经元活动水平，¹⁸F-FDG（氟代脱氧葡萄糖）为其常用示踪剂，可显示葡萄糖代谢情况^[28]。SPECT 以 ^{99m}Tc 等单光子核素示踪剂成像，并以 ^{99m}Tc-ECD 等检测局部脑血流（rCBF）情况^[29]。在癫痫患者发作间期，致痫灶局部脑血流灌注减低，SPECT 通过注射脑血流灌注示踪剂，显示脑内血流灌注异常区域，同样可辅助定位致痫灶。

（二）神经影像学在癫痫发作机制研究中的作用

高分辨率核磁在致痫灶定位及癫痫术前评估中优势显著。7T MRI 可检出如局灶性皮质发育不良等传统 MRI 无法识别的微小致痫病变^[30]，提升了病因检出率与手术定位一致性^[31]。

静息态 fMRI（rs-fMRI）借血氧水平依赖（BOLD）信号构建功能网络，发现致痫灶局部活动一致性高、远端连接弱。颞叶癫痫中，海马与默认模式网络（DMN）连接降低，与突显网络（SN）连接增加，提示兴奋-抑制失衡可能为癫痫发作及认知共病的机制^[32]。同时，网络动态连接高变异性可能是癫痫患者复发率较高的原因之一。

针对常规 MRI 阴性的难治性癫痫（DRE），DTI 通过检测脑白质微结构异常间接定位致痫灶。异常白质网络常累及对侧颞叶、丘脑及前额叶等区域。DTI 可检出相关纤维束受损，为认知共病提供解剖基础^[33]。此外，DTI 还可预测手术预后，致痫灶外

广泛白质损伤提示术后复发风险更高^[34]。

癫痫发作间期致痫灶多表现为局部葡萄糖代谢减低，¹⁸F-FDG PET可通过显像该代谢异常辅助手术定位。¹⁸F-FMZ靶向 GABAA 受体，其定位能力优于¹⁸F-FDG^[35]。

（三）神经影像学的多模态数据融合在个体化治疗中的作用

癫痫作为脑网络疾病，其精准诊疗常受单一影像技术信息局限，而多模态影像融合技术通过整合互补信息系统评估致痫灶与脑网络，已成为术前评估、机制研究及预后判断的核心。

针对高分辨 MRI 阴性的微小隐匿病灶，rs-fMRI 可通过分析功能连接异常缩小致痫范围，结合高分辨 MRI 解剖细节排除干扰^[36]，针对近关键功能区病灶，融合图像能显示病灶与功能区的关系，辅助确定手术范围，降低术后神经功能障碍风险。fMRI/DTI 与 PET/SPECT 的融合，不仅能从结构、分子两方面入手提高手术定位精度，更揭示了癫痫患者功能紊乱背后的病理代谢基础^[37]。

三、机器学习在癫痫精准治疗中的应用与挑战

（一）机器学习技术概述及其在医疗领域的应用潜力

机器学习（ML）^[38]作为人工智能的核心分支，能够从可获得的临床数据中学习规律并构建预测模型。在医疗领域，其应用正从辅助诊断迈向驱动精准治疗。

ML 依据学习范式，可分为监督学习、无监督学习和强化学习。监督学习依据标注数据实现新数据标注预测，无监督学习探索数据内在结构与分布规律，强化学习通过与环境交互及奖励信号寻找最优决策。各范式需用对应算法建模，常用模型有回归分析、支持向量机、决策树、随机森林、聚类算法及深度 Q 网络等。

（二）在癫痫发作预测中的作用

癫痫发作预测是机器学习在癫痫领域的核心应用，其以患者历次发作临床数据为基础，筛选高区分度特征，分析正常、发作前期与发作期差异，构建并验证可实时运行的预测系统^[39]。

近年来，基于 ML 的不断优化，深度学习（DL）逐渐出现。传统 ML 依赖人工提取特征，DL 可从原始信号自动学习特征，并通过卷积神经网络（CNN）、循环神经网络（RNN）、Transformer 等模型用于癫痫发作预测。不同条件下的算法应用不同。对于简单、典型癫痫类型患者，或临床数据资料较少的新发癫痫患者，传统 ML 可避免深度学习因数据不足导致的过拟合，预测精度高于 DL；对于复杂、难治性癫痫类型患者，或长时程预警需求的癫痫患者，DL 泛化能力更高，在大样本条件下预测精度高于 ML^[40]。

（三）支持个体化治疗的机器学习策略

传统病情评估主要依赖医生主观判断，ML 可通过量化数据提升评估的客观性与全面性^[41]。一方面，ML 可通过整合患者的基因

信息、临床基线数据及电生理指标，构建药物应答预测模型，精准判断患者对 AEDs 的有效概率，识别患者发展为药物难治性癫痫的风险，为早期干预提供依据；另一方面，ML 可结合定期监测的血药浓度数据与发作频率变化，构建动态关联模型，生成个体化剂量调整方案^[42]，帮助医生实现药物治疗的精准动态优化，平衡疗效与安全性。针对于已确诊的药物难治性癫痫患者，ML 可精确地定位致痫区，辅助进行手术切除治疗，降低术后神经功能缺损的风险。

四、多模态数据整合与精准治疗闭环构建

整合体系涵盖四类关键数据：分子层面的基因测序数据、影像层面的多模态脑成像数据、电生理层面的脑电数据，以及临床层面的发作量表、病程记录与预后随访信息。其中分子数据锚定病理根源，影像数据揭示网络载体，电生理数据捕捉功能异常，临床数据验证实际疗效。目前已有研究结合颞叶癫痫患者的全脑基因表达数据、fMRI- PET 数据，发现患者的颅内异常网络与主要由葡萄糖代谢的变化所介导，并与抑制性神经元、突触后细胞成分、MAPK 信号通路相关的基因表达谱相关。揭示了颞叶癫痫中遗传因素、代谢过程和脑网络动态之间的关系，为干预方案提供靶点信息^[43]。

（一）精准预后预测

预后预测是治疗闭环的关键环节，多模态预测模型通过整合影像、基因与临床数据，量化评估治疗效果^[44]，指导干预时机与方式选择。Boehm Kevin M 等整合了基因组学、组织病理学和影像学数据，通过晚期融合的方法构建了超越传统单模态模型的预后预测模型^[45]。

（二）动态优化治疗策略

机器学习通过分析多模态数据，为个体化治疗策略制定提供了革命性的技术手段。ML 不仅可以预测患者对 AEDs 的应答概率，还可以辅助调整用药剂量，实现药物治疗的最大效益。

闭环脑机接口（BCI）是治疗闭环的最高形式，以植入式电极实时采集 iEEG 信号，经机器学习驱动的自适应算法识别发作前兆特征，自动触发电刺激阻断发作。近年来，随着 BCI 的不断发展与多模态融合的深入研究，非侵入式 BCI 以安全、便携的优势展现出良好的应用潜力^[46]。

五、总结与展望

本文基于基因组学、神经影像学、机器学习在癫痫领域的研究应用热点，阐释了将多模态数据整合应用于癫痫精准治疗的可行性，将癫痫从一种症状学疾病，重新定义为一种具有特定分子基础、网络表型和临床进程的生物学实体。通过构建从基因到临床表现的完整数据链，实现前所未有的精准诊断、分型与预后预

测。而闭环治疗系统的出现,则将既往经验性为主的治疗方案,转变为一种动态个体化、精准化治疗。

然而,目前多模态数据整合的规模化应用面临大量挑战:多中心数据需要大量高质量的、标注准确的数据,而多中心数据的异构性和数据隐私及伦理限制阻碍了数据共享和模型训练;BCI、可穿戴设备等实时场景,要求ML模型在低算力、低延迟下运行,传统复杂模型虽精度高,但计算复杂度高,在嵌入式设备中

延迟可达5–10秒,无法满足实时干预需求;多数ML研究仍基于单中心回顾性数据,缺乏多中心、前瞻性、随机对照试验验证;DL模型常多具有黑箱效应,缺乏可解释性,医生难以理解其决策逻辑,导致对其临床信任欠缺。希望未来随着代谢组学、免疫标志物等更多数据模态的加入,以及更强大的人工智能算法的应用,癫痫的精准医疗闭环将愈加完善,最终为每一位患者提供最优的个体化诊疗方案。

参考文献

- [1] World Health Organization. Epilepsy: a public health imperative[EB/OL]. [2025-09-10]. <https://www.who.int/publications/i/item/epilepsy-a-public-health-imperative>.
- [2] Ottman R, Hirose S, Jain S, et al. Genetic testing in the epilepsies--report of the ILAE genetics commission[J]. *Epilepsia*, 2010, 51(4): 655–670.
- [3] John S D, Karin T. Advanced neuroimaging techniques in epilepsy[J]. *Current Opinion in Neurology*, 2021.
- [4] Khan A F, Umar Z, Jolfaei A, et al. Explainable AI for epileptic seizure detection in Internet of Medical Things[J]. *Digital Communications and Networks*, 2025, 11(3): 587–593.
- [5] 田美玲, 谭兰. 癫痫的精准诊疗 [J]. *精准医学杂志*, 2018, 33(5): 377–379, 384.
- [6] Knox T A, Thompson H C, Scott D, et al. Genotype–function–phenotype correlations for SCN1A variants identified by clinical genetic testing[J]. *Annals of clinical and translational neurology*, 2025, 12(3): 499–511.
- [7] R B S, Jennifer M, L A B, et al. Genetic testing for the epilepsies: A systematic review[J]. *Epilepsia*, 2021, 63(2): 375–387.
- [8] Zhang G, Huang S, Wei M, et al. Dravet syndrome: novel insights into SCN1A mediated epileptic neurodevelopmental disorders within the molecular diagnostic therapeutic framework[J]. *Frontiers in Neuroscience*, 2025, 19: 1634718–1634718.
- [9] Zhang W, Luo S, Jiang M, et al. CSMD1 as a causative gene of developmental and epileptic encephalopathy and generalized epilepsies[J]. *Genes & Diseases*, 2025, 12(4): 101473–101473.
- [10] Luo S, Wang Y P, Zhou P, et al. Variants in EP400, encoding a chromatin remodeler, cause epilepsy with neurodevelopmental disorders[J]. *American journal of human genetics*, 2024, 112(1): 87–105.
- [11] Lee H S, Liang T, Chandrasekaran G, et al. Mutant zebrafish lacking slc25a22a show spontaneous seizures and respond to the anti-seizure medication valproic acid[J]. *Disease models & mechanisms*, 2025, 18(6).
- [12] Lang Y, Wang X, Yin J, et al. Advances in ion channel genes and genetics of epilepsy[J]. *Chinese journal of neurology*, 2018, 51(8): 642–648.
- [13] 曾玲晖, 丁美萍. mTOR信号通路在癫痫发生中的作用 [J]. *浙江大学学报 (医学版)*, 2013, 42(6): 597–601.
- [14] Boff O M, Xavier C A F, Diz M F, et al. mTORopathies in Epilepsy and Neurodevelopmental Disorders: The Future of Therapeutics and the Role of Gene Editing[J]. *Cells*, 2025, 14(9): 662–662.
- [15] Hsiao J, Yuan T Y, Tsai M S, et al. Upregulation of haploinsufficient gene expression in the brain by targeting a long non-coding RNA improves seizure phenotype in a model of dravet syndrome[J]. *Ebiomedicine*, 2016, 9: 257–277.
- [16] Yosuke N, Shiron L, A B M, et al. Sexually Divergent Mortality and Partial Phenotypic Rescue after Gene Therapy in a Mouse Model of Dravet Syndrome[J]. *Human gene therapy*, 2019, 31(5–6): 339–351.
- [17] Chao L, Eleanor B, Hikmet B, et al. CRISPR/Cas: a Nobel Prize award-winning precise genome editing technology for gene therapy and crop improvement[J]. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE B*, 2021, 22(4): 253–284.
- [18] Shang J, Song F, Zhang Z, et al. Application of novel CRISPR tools in brain therapy[J]. *Life sciences*, 2024, 352: 122855–122855.
- [19] Yamagata T, Raveau M, Kobayashi K, et al. CRISPR/dCas9-based Scn1a gene activation in inhibitory neurons ameliorates epileptic and behavioral phenotypes of Dravet syndrome model mice[J]. *Neurobiology of Disease*, 2020, 141 (prepublish): 104954.
- [20] Gaia C, Yichen Q, Luca M, et al. In vivo CRISPRa decreases seizures and rescues cognitive deficits in a rodent model of epilepsy[J]. *Brain : a journal of neurology*, 2020, 143(3): 891–905.
- [21] Wang L, Zeng G, Li J, et al. Association of valproic acid-related pharmacodynamics, pharmacokinetic pathways and transporter gene polymorphisms and antiepileptic efficacy in Chinese Patients[J]. *Xenobiotica: the fate of foreign compounds in biological systems*, 2025, 55(5): 1–20.
- [22] 李莹雪, 李会婷, 吴妍, 等. HLA-B基因多态性与抗癫痫药拉莫三嗪致皮肤不良反应关系的 meta 分析 [J]. *中国现代应用药学*, 2024, 41(01): 126–132.
- [23] 钟莉莉, 陈君, 王榆雅, 等. 海南地区癫痫儿童 HLA-B*1502 基因与芳香族抗癫痫药物治疗后皮肤型药物不良反应的相关性研究 [J]. *实用临床医药杂志*, 2023, 27(08): 36–39+47.
- [24] Paola N, Andrew D, YiJu L, et al. HLA-B*53:01 is a significant risk factor for liver injury due to phenytoin and other anti-epileptic drugs in African Americans[J]. *The American journal of gastroenterology*, 2023, 119(1): 200–202.
- [25] 马林. 神经影像学技术创新发展与挑战 [J]. *中华医学信息导报*, 2023, 38(23): 14–14.
- [26] 彭兴珍, 宗会迁, 张娅, 等. 基于结构像及静息态功能 MRI 无灶性癫痫患者与正常人脑网络对比研究 [J]. *临床放射学杂志*, 2025, 44(07): 1188–1196.
- [27] Özgür Palancı, Tülay Kamaşak, Zeliha Aydın Kasap, et al. Volumetric and microstructural changes in the Hippocampus and cingulum in children with west syndrome[J]. *Brain & development*, 2025, 47(3): 104365.
- [28] 崔瑞雪, 周前, 秦国明. 18F-FDG PET 脑显像在癫痫图型、病灶定位及预后预测中的价值 [J]. *中华核医学杂志*, 2001, 21(1): 9–11.

- [29]李志刚,舒博学,邹保民.99Tcm-ECD SPECT显像定量测定癫痫局部脑血流量[J].西安医科大学学报,2002,23(1):38-39,55.
- [30]H. E M ,Elena G ,Xiangzhi Z , et al.Edge-Enhancing Gradient Echo MRI at 7T for detection of focal cortical dysplasia in epilepsy[J].Neuroimage: Reports,2023,3(4):100187-.
- [31]van Lanen R H G J ,Colon A J ,Wiggins C J , et al.Ultra-high field magnetic resonance imaging in human epilepsy: a systematic review[J]. Neuroimage. Clinical, 2021 , 30: 102602.
- [32]赵家瑞,龚玉来.静态功能磁共振成像在颞叶癫痫认知损害中的研究进展[J].实用医学杂志,2024,40(20):2954-2959.
- [33]Rostampour M ,Hashemi H ,Najibi M S , et al.Detection of structural abnormalities of cortical and subcortical gray matter in patients with MRI-negative refractory epilepsy using neurite orientation dispersion and density imaging[J].Physica Medica,2018,4847-54.
- [34]Isabel M M S ,A. R S ,Olli G , et al.Histopathological modeling of status epilepticus-induced brain damage based on in vivo diffusion tensor imaging in rats [J].Frontiers in Neuroscience,2022,16944432-944432.
- [35]Niu N ,Xing H ,Wu M , et al.Performance of PET imaging for the localization of epileptogenic zone in patients with epilepsy: a meta-analysis[J].European Radiology,2021,31(8):1-14.
- [36]Nothnagel N ,Morgan T A ,Muckli L , et al.Revealing layer-specific cortical activity in human M1 using high-resolution line-scanning fMRI[J].Imaging Neuroscience,2025,3imag_a_00477-imag_a_00477.
- [37]Hu J ,Cui B ,Wang Z , et al.Transcriptomic and glucose metabolism of connectome dynamics variability in temporal lobe epilepsy revealed by simultaneous PET-fMRI[J].Neurobiology of disease,2025,212106967.
- [38]Y R C ,S A C ,Jayashree K , et al.Introduction to Machine Learning, Neural Networks, and Deep Learning[J].Translational vision science & technology,2020,9(2):14.
- [39]Malkov A E ,Lebedeva A V ,Gerasimova S A , et al. Multiparametric machine learning for predicting epileptic hyperexcitability from interictal EEG background activity[J].Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2026, 152: 109210.
- [40]Mourad R ,Diab A ,Merhi Z , et al.Machine and deep learning methods for epileptic seizure recognition using EEG data: A systematic review[J].Brain research,2025,1864149797.
- [41]董志远,阳勇,于跃,王雁.机器学习在癫痫方面的应用进展[J].中华神经科杂志,2024,57(2):185-191.
- [42]詹世鹏,马攀,刘芳.机器学习在治疗药物监测与个体化用药中的应用[J].中国药房,2023,34(1):117-121,128.
- [43]Hu J ,Cui B ,Wang Z , et al.Transcriptomic and glucose metabolism of connectome dynamics variability in temporal lobe epilepsy revealed by simultaneous PET-fMRI[J].Neurobiology of disease,2025,212106967.
- [44]Chen Y ,Zhang X ,Wu Y , et al.Segregation and integration of subcortical brain network in temporal lobe epilepsy[J].Chaos, Solitons and Fractals: the interdisciplinary journal of Nonlinear Science, and Nonequilibrium and Complex Phenomena,2025,201(P1):117212-117212.
- [45]M. K B ,A. E A ,Lora E , et al.Multimodal data integration using machine learning improves risk stratification of high-grade serous ovarian cancer[J].Nature Cancer,2022,3(6):723-733.
- [46]Jirsa V ,Wang H ,Triebkorn P , et al. Personalised virtual brain models in epilepsy[J]. The Lancet. Neurology, 2023, 22(5): 443-454.