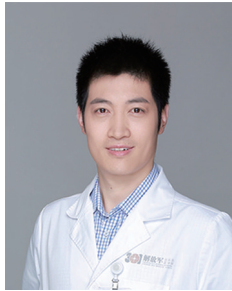


[专家简介] 李涛,解放军总医院医学创新研究部副研究员,硕士。主要研究方向为医疗大模型与具身智能医疗机器人。牵头新一代人工智能国家科技重大专项和后勤科研重点项目等多项国家和军队课题。发表论文25篇,授权和受理专利13项,参编专著5部。获军队科技进步二等奖1项。被评为解放军总医院“军事医学科技创新先进个人”和北京市卫健委“首都医学创新学者”。兼任中国生物医学工程学会临床医学工程分会委员和中国研究型医院学会转化医学分会理事。



[专家简介] 李坤鹏,解放军总医院第一医学中心风湿免疫科副主任医师,医学博士。主持和参与国家科技部科技创新2030重大项目、973课题、十二五科技支撑计划、国家自然科学基金等多项课题。北京医学会风湿病学分会青年委员兼秘书,全军免疫学专业委员会青年委员,海峡两岸医药卫生交流协会风湿免疫病学专业委员会IgG4学组委员,海峡两岸医药卫生交流协会风湿免疫病学专业委员会慢病学组青年委员。

从数据到决策:探索机器学习在中轴型脊柱关节炎诊疗中的应用

孙磊¹, 冀肖健², 雷瑛¹, 宋一敏¹, 李坤鹏², 李涛^{1,3}

¹解放军总医院医学创新研究部, 北京 100853; ²解放军总医院第一医学中心风湿免疫科, 北京 100853; ³解放军总医院医疗大数据应用技术国家工程研究中心, 医学工程实验室, 北京 100853

摘要:中轴型脊柱关节炎是一种慢性炎症性疾病,早期诊断和治疗对改善患者预后至关重要。传统的诊疗方法在应对中轴型脊柱关节炎的复杂性和异质性方面存在诸多局限性,其中误诊率高、诊断延迟时间长的问题尤为突出。机器学习技术的引入为中轴型脊柱关节炎的诊疗带来了革命性的突破。本文探讨了机器学习在中轴型脊柱关节炎诊疗中的研究进展和应用潜力,比较了模型应用的优缺点,分析了现有研究的局限性并展望了未来发展方向。

关键词:中轴型脊柱关节炎;机器学习;应用

中图分类号:R593.23

文献标志码:A

文章编号:2095-5227(2025)03-0224-06

DOI: 10.12435/j.issn.2095-5227.25022401

引用本文:孙磊,冀肖健,雷瑛,等.从数据到决策:探索机器学习在中轴型脊柱关节炎诊疗中的应用[J].解放军医学院学报,2025,46(3):224-229.

From data to decision: Application of machine learning in diagnosis and treatment of axial spondyloarthritis

SUN Lei¹, JI Xiaojian², LEI Ying¹, SONG Yimin¹, LI Kunpeng², LI Tao^{1,3}

¹Medical Innovation Research Department of PLA General Hospital, Beijing 100853, China; ²Department of Rheumatology and Immunology, the First Medical Center of PLA General Hospital, Beijing 100853, China; ³National Engineering Research Center for Medical Big Data Application Technology, Medical Engineering Laboratory of PLA General Hospital, Beijing 100853, China

Corresponding author: LI Tao. Email: litao301hospital@163.com LI Kunpeng. Email: lkp_01@163.com

Abstract: Axial Spondyloarthritis (axSpA), as a chronic inflammatory disease, requires early diagnosis and treatment to improve patient outcomes. Traditional methods have many limitations in addressing the complexity and heterogeneity of axSpA, with particularly prominent issues of high misdiagnosis rates and long diagnostic delays. The introduction of machine learning

收稿日期:2025-02-24

基金项目:北京市自然科学基金-海淀原始创新联合基金(L242143);新一代人工智能国家科技重大专项(2021ZD0140409)

第一作者:孙磊,硕士。Email: rubysl@126.com 共同第一作者:冀肖健,博士。Email: jixiaojian1990@163.com

通信作者:李涛,硕士,副研究员。Email: litao301hospital@163.com

李坤鹏,博士,副主任医师。Email: lkp_01@163.com

technology has brought revolutionary breakthroughs in the diagnosis and treatment of axSpA. This review explores research advances and application potential of machine learning in the diagnosis and treatment of axSpA, evaluates the strengths and weaknesses of current models, analyzes the limitations of existing research, and proposes future development directions.

Keywords: axial spondyloarthritis; machine learning; application

Cited as: Sun L, Ji XJ, Lei Y, et al. From data to decision: Application of machine learning in diagnosis and treatment of axial spondyloarthritis[J]. Acad J Chin PLA Med Sch, 2025, 46(3): 224-229.

中轴型脊柱关节炎(axial spondyloarthritis, axSpA)是一种慢性炎症性疾病,主要影响脊柱和骶髋关节,导致患者出现慢性腰背痛和晨僵,并可能伴有外周关节炎、附着点炎、葡萄膜炎、银屑病和炎症性肠病^[1]。axSpA可分为放射学阳性的强直性脊柱炎(ankylosing spondylitis, AS)和放射学阴性中轴型脊柱关节炎(non-radiographic axial spondyloarthritis, nr-axSpA)两类。根据2009年国际脊柱关节炎评估协会(Assessment of Spondylo Arthritis International Society, ASAS)的分类标准可以早期诊断axSpA^[2]。axSpA的全球患病率尚无明确定义,估计范围为0.3%~1.4%^[1],中国患病率约1%^[3]。axSpA起病隐匿、进展缓慢、早期症状不典型,易与其他腰背痛疾病混淆,加之缺乏特异性生物标志物,常导致误诊,从而增加了该疾病早期发现和诊断的难度^[4]。目前,axSpA的诊断延迟仍是一个全球性问题^[5],最新研究结果显示患者平均诊断延迟时间为7.4年,不同地区之间存在显著差异^[6]。诊断延迟可能导致患者出现更严重的症状和生活质量下降,包括更高的疾病活动度、更差的身体功能、更高的医疗成本以及更高的工作能力丧失风险^[7]。axSpA患者群体中,抑郁症的发病率显著升高^[8],超过半数的患者普遍存在疲劳感^[9]。这不仅降低了患者的生活质量,也对其社会功能产生了重大影响。在缺乏标准化治疗的情况下,AS患者的3年致残率可达45.5%,5年致残率可达70%^[10]。因此,减少axSpA的诊断延迟对于改善患者的生活质量至关重要,早期诊断和及时干预可以显著降低患者的致残风险,并改善长期预后。然而,尽管早期诊断极为关键,但在实际临床实践中,由于我国风湿免疫病专业起步较晚,专业人才短缺,axSpA的早期诊断仍面临着巨大的挑战^[11]。未设置风湿免疫科的医疗机构通常缺乏专业的风湿免疫学专家,导致误诊率较高,这不仅延误了最佳治疗时机,也增加了医疗负担。此外,医疗机构积累的大量患者数据往往未被充分利用,进一步加剧了诊断的困难。因此,迫切需要开发高效且准确的辅助诊断工具来提高医疗机

构对axSpA的诊断能力。近年来,人工智能(artificial intelligence, AI)和机器学习技术迅猛发展,在医疗领域的应用日益广泛。机器学习通过分析大规模数据,能够识别出潜在的疾病特征,并构建辅助诊断和预测模型,为axSpA的诊断和治疗提供新的思路和工具。本文旨在探讨机器学习在axSpA诊疗中的最新突破和进展,为未来的研究和临床实践提供有价值的参考。

1 机器学习简介

机器学习是一门致力于研究如何通过计算的手段,利用经验来改善系统自身性能的学科。机器学习通过算法使计算机系统识别数据中的隐藏关联并做出预测或决策,无论是简单的线性回归还是复杂的支持向量机,都依赖于人工设计的特征来构建模型;而深度学习作为机器学习的一个重要分支,模仿人脑神经网络的多层结构,能够自动从原始数据中逐级抽丝剥茧,在图像识别、自然语言处理等领域展现出强大的自学习能力。自20世纪50年代以来,机器学习经历了从简单的模式识别到复杂的深度学习模型的演变,其发展历程与计算能力的提升与数据资源的丰富密切相关。机器学习的优势在于其能够处理大规模、高维度的数据,并从中提取出关键的模式和关联。在医疗领域,机器学习已被广泛应用于疾病预测、诊断辅助、治疗方案优化等方面^[12]。

在axSpA的诊疗中,机器学习展现出巨大的应用潜力。通过分析患者的临床数据、影像学资料 and 生物标志物,机器学习模型可以帮助医师更早、更准确地诊断axSpA,从而为患者提供更及时的治疗。Chen等^[4]探讨了机器学习在axSpA诊断和治疗中的应用进展,从早期诊断、分层、疾病监测、药物疗效评估和合并症预测5个方面进行了阐述,其指出机器学习通过整合多模态数据,为axSpA的精准诊疗提供了一种新思路。Adams等^[13]回顾了AI在风湿病学磁共振成像(magnetic resonance imaging, MRI)分析中的应用,机器学习作为AI的子集,在风湿病学MRI分析中展现出巨

大潜力。机器学习模型能够根据临床和影像学数据支持诊断、分类疾病,评估疾病活动度,并预测疾病进展和治疗反应,不仅能够提高诊断的准确性和一致性,还能够自动化复杂的影像分析流程,从而节省时间和资源。随着技术的持续革新,机器学习正在重塑风湿免疫疾病的诊疗范式,通过多模态数据融合揭示疾病演变的隐匿规律,构建跨越分子、影像、临床表型的全景认知网络。

面对 axSpA 带来的公共卫生挑战,结合风湿免疫学的专业知识与先进的计算机科学技术,尤其是机器学习技术,将有助于探索更有效的诊断和治疗策略,从而改善患者的预后。

2 基于影像学图像数据的 axSpA 辅助诊断

影像学检查是 axSpA 诊断的重要工具,通过 X 线检查、MRI 和 CT 等手段,可以评估脊柱和骶髂关节的炎症(主要为骨髓水肿)和结构性病变(骨侵蚀、新骨形成、关节面硬化和脂肪沉积)^[14]。机器学习技术通过分析大规模的影像学数据、电子健康记录和其他多模态信息,能够识别出潜在的疾病特征,辅助医师实现 axSpA 的诊断,提高诊断效率和准确性,降低误诊率,为患者争取早期治疗的机会,从而更好地服务于临床实践。Moon 等^[15]综述了机器学习模型在 MRI 影像中区分骶髂关节的活动性炎症和结构性改变的性能,文章共纳入 10 项研究,其中 6 项为深度学习模型,4 项为传统机器学习模型,该系统综述的结果表明,机器学习模型具有与放射科医师相当的诊断效能,但多项研究存在样本量小、过拟合及外部验证不足等问题,未来需要设计更严谨、透明的研究,以提高机器学习模型的可靠性和通用性。Bordner 等^[16]研究开发并评估了一种基于 10 个独立 Mask-RCNN 模型的集成模型,用于检测骶髂关节的骨髓水肿,并基于 ASAS 标准判断慢性炎症性腰痛患者的活动性骶髂关节炎,结果显示内部验证基线数据 AUC 达 0.980,5 年随访 AUC 为 0.900,10 年随访 AUC 为 0.800,小规模外部验证 AUC 为 0.760(表 1),通过多个评价指标的直接对比,证明该模型达到或接近了专家水平,为骶髂关节炎的诊断提供了新的工具。Nicolaes 等^[17]通过分析 731 例 axSpA 患者的骶髂关节 MRI 数据,验证了该深度学习模型在大规模多中心外部队列中检测骶髂关节炎的效能,其敏感度为 70%、特异度为 81%,可有效辅助放射科医师和风湿科医师进行 axSpA 的

早期诊断。Zhang 等^[18]评估了深度学习放射组学(deep learning radiomics, DLR)模型在诊断 axSpA 相关骶髂关节炎方面的表现,研究者分别训练了基于 ResNet50、ResNet101 和 DenseNet121 三种卷积神经网络(convolutional neural network, CNN)的单模态影像模型,并整合不同模态的 CNN 预测结果构建集成模型,选择最优集成模型作为 DLR 特征,随后采用多变量逻辑回归,结合 DLR 特征与临床信息开发联合模型,结果表明结合 DLR 特征和临床信息的联合模型取得了最优的诊断性能,AUC 为 0.910,这项研究为开发用于诊断 axSpA 相关骶髂关节炎的模型提供了新的思路。Willesen 等^[19]评估了基于 MRI 的合成 CT(sCT)、低剂量 CT 和 X 线检测 axSpA 患者脊柱新骨形成的能力,结果显示 sCT 在保持高特异性的同时,敏感度显著优于 X 线检查,sCT 可能成为检测 axSpA 患者脊柱结构损伤的有力工具。Li 等^[20]基于 5 389 例骨盆 X 线检查数据开发了一种集成深度学习模型,用于 AS 的诊断。研究结果表明,该模型在多中心外部测试集中表现出色,AUC 达 0.960,准确率为 91%,显著优于放射科专家。骶髂关节 MRI 影像是 axSpA 诊断的重要工具,尽管 ASAS 工作组对阳性发现和阴性发现有明确的定义,但放射科医师之间的阅片一致性仍有限,即使在有经验的医师之间也不例外^[16]。在此背景下,机器学习模型正逐步突破传统阅片模式的局限,为影像解读提供新的工具,通过对 X 线检查、MRI 及 CT 影像的智能解析,系统能够有效识别骶髂关节炎、骨髓水肿、骨侵蚀等影像学特征,并在诊断准确性和效率方面表现出与专家相当甚至更优的性能。未来,基于影像学的辅助诊断系统有望成为基层医师的“数字影像顾问”,通过实时骶髂关节炎炎症量化评分、自动生成结构化报告等功能,大幅缩短诊断延迟,让更多 axSpA 患者在疾病早期获得精准干预。

3 基于多模态数据的 axSpA 综合诊断

基于综合信息的辅助诊断方法通过整合患者的临床症状、实验室检查结果、影像学资料以及其他相关数据,可以提供更为全面、精准的诊断,有助于提高 axSpA 的早期诊断率。Redeker 等^[21]开发了一种基于机器学习的诊断模型,帮助医师区分 axSpA 患者和患有慢性背痛但未患 axSpA 的患者,研究人员使用来自德国一家三级风湿病中心的临床数据,包括患者的病史、体格检查、实验

表 1 机器学习模型总结

Tab. 1 Summary of machine learning models

文献出处	作者	任务目标	数据类型	样本量	模型/模型名称	模型性能	外部验证	多中心验证
Diagn Interv Imaging, 2023	Bordner ^[16]	基于ASAS标准判断活动性骶髂关节炎	骶髂关节MRI影像	362,47 (外部测试集)	基于10个独立Mask-RCNN模型的集成模型	AUC=0.980(基线), AUC=0.900(5年随访), AUC=0.800(10年随访), AUC=0.760(外部验证)	是	是
Ann Rheum Dis, 2024	Nicolaes ^[17]	基于ASAS标准判断活动性骶髂关节炎	骶髂关节MRI影像	731 (外部测试集)	深度学习模型	敏感度70%, 特异度81%	是	是
Eur J Radiol, 2024	Zhang ^[18]	诊断axSpA相关骶髂关节炎(影像模型)	MRI影像(单模态模型:T1WI或STIR;多模态集成模型:T1WI和STIR)	485	单模态模型: ResNet50, ResNet101, DenseNet121, 多模态集成模型: XGBoost, SVM, AdaBoost等	AUC=0.839(最优单模态模型 ResNet50 T1WI), AUC=0.868(最优多模态集成模型 XGBoost)	否	否
Eur J Radiol, 2024	Zhang ^[18]	诊断axSpA相关骶髂关节炎(联合诊断模型)	MRI影像(T1WI和STIR)、临床数据	485	结合DLR特征与临床信息的多变量逻辑回归模型	AUC=0.910	否	否
Ann Rheum Dis, 2024	Willesen ^[19]	将MRI数据合成sCT影像,用于检测axSpA患者脊柱新骨形成	MRI影像	17	BoneMRI(V1.6)	-	否	否
Front Public Health, 2023	Li ^[20]	AS诊断	骨盆X线片影像	5 389,539 (外部测试集)	基于ResNet50等10个CNN模型中的前5名构建的集成模型	AUC=0.980(内部验证), AUC=0.960(外部验证)	是	是
RMD open, 2024	Redeker ^[21]	区分axSpA与非axSpA慢性背痛患者	临床、实验室和影像数据	701	随机森林	AUC=0.972	否	否
Comput Biol Med, 2024	Jia ^[22]	AS早期诊断	临床、实验室和影像数据	177	bSCJAYA-FKNN	准确率99.23%, 特异性99.52%	是	否
磁共振成像, 2023	辛培锦 ^[23]	辅助诊断axSpA	临床、实验室和影像数据	204	基于临床参数与影像组学特征融合构建的列线图模型	AUC=0.944	否	否
Front Immunol, 2024	Hu ^[24]	AS髌关节受累表型分析	MRI放射组学特征	167	无监督层次聚类、共识聚类	-	否	否
RMD open, 2024	Dorfner ^[25]	骶髂关节炎检测和进展预测	裁剪后的骨盆X线片影像	1 483,436(外部测试集1), 340(外部测试集2), 163(外部测试集3)	解剖学中心模型(ResNet-50)	AUC=0.900, AUC=0.899(外部测试集1), AUC=0.846(外部测试集2), AUC=0.957(外部测试集3)	是	是
PLoS ONE, 2023	Kennedy ^[26]	预测AS诊断	临床和影像数据	793	决策树模型	AUC=0.870(男性), AUC=0.863(女性)	否	否
JAMA Netw Open, 2022	Wang ^[27]	预测AS患者对TNFi的短期反应	基线临床变量	1 207,692(外部测试集)	逻辑回归、随机森林、支持向量机、梯度提升树、线性判别分析	AUC=0.650~0.670(有主要反应,外部验证), AUC=0.620~0.660(无反应,外部验证)	是	是

室检测结果和影像学检查结果, 构建了随机森林模型。结果表明, 模型中贡献度排名前3名的变量分别是HLA-B27阳性、隐匿性腰痛发作和骶髂关节侵蚀, 该研究有望帮助医师更早地识别axSpA

患者, 从而改善治疗效果。Jia等^[22]开发一种基于机器学习的辅助诊断方法, 用于早期诊断AS。文章提出了一种改进的JAYA优化算法, 称为SCJAYA, 并将其与模糊K近邻(Fuzzy K-Nearest

Neighbor, FKNN) 分类器相结合, 构建了 bSCJAYA-FKNN 模型。结果表明, bSCJAYA-FKNN 模型具有良好的分类能力, 有望为 AS 的诊断和预测提供有效的工具。辛培锦等^[23]通过结合骶髂关节 MRI 影像组学特征和临床参数, 建立一个列线图模型以辅助诊断 axSpA, 该研究回顾性分析了 204 例患者的数据, 提取了 C 反应蛋白和红细胞沉降率作为临床标签, 并从 T1WI 和脂肪抑制 T2WI 序列图像中分别提取了 1 834 个影像组学特征, 最终构建的列线图模型表现出优异的诊断性能, 能够有效区分 axSpA 患者和健康对照组, 为临床诊断提供了有力工具。通过挖掘多源异构数据的深层关联, 基于多模态数据的综合诊断方法正逐步突破传统诊断的局限性, 有望在临床实践中实现更高效的早期诊断, 最终改善患者预后并减轻医疗负担。

4 axSpA 患者分层与预测

axSpA 的疾病进展具有高度异质性, 不同患者之间的病情发展速度和严重程度差异较大, 部分患者可能迅速进展为严重脊柱畸形, 而另一些患者则病情相对稳定, 准确预测个体患者的疾病进展情况对于制定长期管理策略至关重要。借助机器学习技术, 可以从患者的临床数据、影像学资料及其他相关信息中提取有价值的特征, 构建模型对患者进行分层并评估未来疾病的进展趋势。此类模型不仅可以提高对疾病史的理解, 还可为个性化治疗方案的设计提供依据。Hu 等^[24]探讨了基于放射组学的机器学习模型在 AS 患者髋关节受累表型分析中的可行性。研究人员对 167 例 AS 患者的骨盆 MRI 进行分析, 并提取了 1 321 个稳健的放射组学特征, 通过无监督机器学习方法, 将患者分为 4 种不同的表型。结果表明, 高风险表型与 MRI 检测到的结构性损伤与部分活动性炎症的发生率显著相关, 高风险表型与低风险表型相比, 发生放射学髋关节病变的可能性高出 3 倍。Dorfner 等^[25]探讨了基于解剖学的深度学习融入模型是否可以提高泛化性并实现疾病进展预测, 结果表明基于解剖学模型识别为高风险的患者在 2 年内出现放射学骶髂关节炎进展的概率是其他患者的 2.16 倍, 基于解剖学的深度学习可以提高模型在检测放射学骶髂关节炎方面的泛化性。Kennedy 等^[26]研究了如何利用机器学习方法, 通过初级保健健康记录预测 AS 的诊断。结果显示, 对于男性患者,

年轻时的下背痛、葡萄膜炎和 20 岁前使用非甾体抗炎药与 AS 的发生相关; 而对于女性患者, 则表现出比男性更晚的症状出现年龄, 并伴随背痛和多种镇痛药物的使用。模型在测试数据集中表现出良好的预测能力, 但在低患病率的普通人群中, 阳性预测值会显著降低。因此, 未来需要进一步研究和改进模型, 以提高其在临床实践中的应用价值。Wang 等^[27]开发和验证了 AS 患者对肿瘤坏死因子抑制剂 (tumor necrosis factor inhibitor, TNFi) 的短期治疗反应概率模型。研究者建立了基于基线变量的预测模型, 并验证了其在预测个体患者对 TNFi 治疗的反应概率方面的准确性。结果显示, 该模型可以准确预测患者对 TNFi 治疗的反应概率, 有助于个性化治疗决策。机器学习模型在 axSpA 患者分层与预测中的应用, 正通过多维度数据融合重新定义精准医疗的实践路径, 为破解 axSpA 异质性难题提供了智能化的决策引擎。

5 结语和展望

机器学习在 axSpA 诊疗中呈现出多元化的应用趋势, 不同模型在特定任务上展现出各自的优势。传统机器学习模型, 如随机森林、支持向量机, 在结构化临床参数分析中表现稳定, 但这类模型对影像等数据的处理能力有限, 当面对 MRI 影像中复杂的空间特征时, 传统特征提取方法难以捕捉细微变化。相比之下, 深度学习模型通过端到端学习机制突破了这一瓶颈, 在图像识别和特征提取方面表现出色, 可以自动从影像学数据中学习复杂的特征, 从而辅助医师进行更精准的诊断, 但深度学习模型对数据量和标注质量依赖度高, 并且可解释性较差。针对多模态数据融合场景, 集成学习与混合模型展现出更强的适应性, 但此类模型的复杂性也带来计算成本的上升, 并且可能引入噪声干扰。机器学习模型的构建需紧密契合数据类型、任务目标及临床场景的特定需求, 模型选择应遵循“临床问题驱动”原则, 结合数据特性与终端场景进行动态优化。

机器学习在 axSpA 诊疗领域的应用展现出巨大潜力, 但目前研究仍面临诸多挑战。首先, 在数据层面, 现有研究普遍存在数据质量缺陷, 包括样本量小、数据来源单一、数据采集和存储缺乏统一规范、采集过程缺乏标准化质量控制等问题, 这些缺陷限制了模型的泛化能力, 影响了临床应用效果; 数据质量的另一薄弱环节在于时

序信息的断裂,影像和实验室指标的变化趋势、药物治疗的阶段响应等时间序列特征往往被简化为独立时间点的孤立信息,其动态演变规律未被有效整合,这导致模型无法捕捉到疾病发展过程中的动态变化,从而影响模型的预测精度。其次,在模型验证层面,现有研究多集中于模型开发和性能评估,缺乏外部验证和多中心临床验证,导致模型在实际应用中的可靠性和有效性难以得到充分证实,当模型部署到不同地域、不同层级的医疗机构时,患者的人口学特征、疾病表型分布以及影像设备的性能差异可能导致模型性能的下降。最后,在临床应用转化层面,现有研究大多停留在技术验证阶段,缺乏在真实医疗场景落地的系统设计,模型开发与临床需求之间存在显著脱节,多数研究以模型精度为单一优化目标,而忽视了临床工作流程的适配性。以上问题共同制约了机器学习在axSpA诊疗中的应用价值,迫切需要从数据质量、模型验证、临床应用转化等方面进行改进,从而推动机器学习技术真正服务于axSpA患者的诊疗。

展望未来,机器学习在axSpA诊疗中的应用需要重点关注以下几个方面:(1)建立多中心数据共享平台,整合来自不同医疗机构和科研机构的axSpA数据,扩大数据规模,提高数据质量,建立统一的数据采集标准和质量管理体系,确保模型训练数据的同质性、准确性和可靠性。(2)开展多中心、大规模的临床验证研究,确保模型在不同地域、不同层级的医疗机构中的可靠性和有效性,评估模型在临床实践中的应用价值,推动其从实验室走向临床,为医师提供可靠的辅助诊断工具。(3)加速模型融入实际诊疗流程,并构建“临床需求-模型开发-系统部署-模型进化”的闭环反馈机制,在模型设计初期通过多学科协作共同定义核心功能需求,确保模型开发紧密贴合临床实际情况,对模型如何融入实际诊疗流程进行系统设计,建立覆盖模型全生命周期的动态管理机制,基于真实世界数据监控模型性能,对模型进行持续的迭代和优化。通过上述数据治理、模型验证与临床落地的措施,可以实现axSpA诊疗的精准化、个性化和动态进化。

随着机器学习技术的持续进步和数据资源的日益积累,机器学习正在为axSpA的诊疗带来革命性的变化,其核心价值体现在通过影像智能分

析突破人类视觉局限,借助数据融合揭示多维病理关联及基于动态预测实现治疗关口前移。机器学习与风湿免疫学的深度交叉融合,将推动axSpA诊疗迈入智能决策的新阶段,为患者提供更加精准和个性化的医疗服务,构筑起守护患者生命质量的智能防线。

作者贡献 孙磊:文章撰写和修改;冀肖健:文献查询,文章修改;雷瑛、宋一敏:文献查询,文章整理;李涛、李坤鹏:论文的设计、指导与修改。

利益冲突 所有作者声明无利益冲突。

参考文献

- 1 Bittar M, Deodhar A. Axial spondyloarthritis: a review [J]. JAMA, 2025, 333 (5): 408-420.
- 2 Rudwaleit M, Van der Heijde D, Landewé R, et al. The development of Assessment of SpondyloArthritis international Society classification criteria for axial spondyloarthritis (part II): validation and final selection [J]. Ann Rheum Dis, 2009, 68 (6): 777-783.
- 3 中国研究型医院学会关节外科学专业委员会. 中轴型脊柱关节炎诊断和治疗的专家共识(2019年版)[J]. 中华关节外科杂志(电子版), 2019, 13 (3): 261-266.
- 4 Chen YN, Liu HX, Yu Q, et al. Entry point of machine learning in axial spondyloarthritis [J]. RMD Open, 2024, 10 (1): e003832.
- 5 Bittar M, Deodhar A. A critical view of WHO guidelines on management of low back pain [J]. Nat Rev Rheumatol, 2024, 20 (4): 201-202.
- 6 Poddubnyy D, Garrido-Cumbrera M, Sommerfleck F, et al. Diagnostic delay in patients from the international map of axial spondyloarthritis: geographic, socio-demographic and disease-related factors [J]. Rheumatology (Oxford), 2025, 64 (4): 1873-1879.
- 7 Barnett R, Gaffney K, Sengupta R. Diagnostic delay in axial spondylarthritis: a lost battle? [J]. Best Pract Res Clin Rheumatol, 2023, 37 (3): 101870.
- 8 Zhao SZ, Thong D, Miller N, et al. The prevalence of depression in axial spondyloarthritis and its association with disease activity: a systematic review and meta-analysis [J]. Arthritis Res Ther, 2018, 20 (1): 140.
- 9 Tang HM, Singh BSM, Fong W. Prevalence and factors associated with fatigue in patients with axial spondyloarthritis: a systematic review and meta-analysis [J]. Rheumatol Adv Pract, 2023, 7 (3): rkad084.
- 10 Zhao Y, Wang Q, Duan LH, et al. Current health resources required for the management of ankylosing spondylitis in developing areas of China [J]. Chin Med J (Engl), 2023, 136 (6): 737-739.
- 11 薛雷喜,温健,李凌云,等.风湿免疫科在住院医师规培中的困境初探[J].中国继续医学教育,2021,13(15):95-98.
- 12 田林,任绪泽,涂峥程.人工智能、机器学习和深度学习在医学诊断中的应用进展[J].现代医学,2024,52(9):1480-1484.
- 13 Adams LC, Bressen KK, Ziegeler K, et al. Artificial intelligence to analyze magnetic resonance imaging in rheumatology [J]. Joint Bone Spine, 2024, 91 (3): 105651.

(下转第238页)