

机器学习模型在颈椎病中的应用进展

杨文通, 赵继荣, 薛旭, 马东, 赵瑞, 刘俊豪, 马伯骞
甘肃中医药大学中医临床学院, 甘肃 兰州 730030

【摘要】颈椎病的诊断、治疗和预后评估是临床诊疗中的难题。机器学习模型可通过对临床复杂数据的处理,提高颈椎病诊断的精准度和效率,协助临床医生选择更精准的治疗方案,并评估预后。笔者通过综述近年来机器学习模型应用于颈椎病领域的国内外文献,分类总结应用于颈椎病诊断、治疗和预后评估方面的有关模型,介绍了随机森林等经典算法,以及卷积神经网络、深度神经网络、长短期记忆网络等新型算法,旨在为颈椎病诊疗的各阶段提供可参考的机器学习方案。

【关键词】颈椎病;机器学习;深度学习;综述

【中图分类号】R318;653

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2025)02-0269-05

Advances in machine learning models for cervical spondylosis

YANG Wentong, ZHAO Jirong, XUE Xu, MA Dong, ZHAO Rui, LIU Junhao, MA Boqian

Clinical College of Traditional Chinese Medicine, Gansu University of Chinese Medicine, Lanzhou 730030, China

Abstract: The diagnosis, treatment, and prognosis evaluation of cervical spondylosis are challenging in clinic. Machine learning (ML) models can improve the accuracy and efficiency of cervical spondylosis diagnosis by processing complex clinical data, assist in selecting more precise treatment plans, and evaluate prognosis. Through the domestic and foreign literature review on the application of ML models in cervical spondylosis in recent years, the study classifies and summarizes the relevant models applied in the diagnosis, treatment, and prognosis evaluation of cervical spondylosis, introduces classic algorithms such as random forest, as well as new algorithms such as convolutional neural networks, deep neural networks and long short-term memory networks, aiming to provide reference ML solutions for various stages of cervical spondylosis diagnosis and treatment.

Keywords: cervical spondylosis; machine learning; deep learning; review

前言

颈椎病是指由于椎间盘退变、骨质增生、韧带钙化等病理因素导致神经根、脊髓、椎动脉等受压而引发颈肩臂麻木疼痛、活动不利、头痛眩晕,甚至视物模糊、恶心乏力、瘫痪等症状的临床综合征^[1]。据统计,颈椎病在我国的患病率约为13.76%,是导致残疾的主要原因之一^[2-3]。随着人们生活习惯和工作方式的日新月异,颈椎病的发病率逐年攀升且有低龄化趋势,给患者、家庭和社会带来了不可估量的心理和

经济负担^[4]。机器学习(Machine Learning, ML)是以计算机技术和统计学方法为基石的人工智能(Artificial Intelligence, AI)的重要分支,通过不断提高计算机数据学习和算法性能,智能识别数据的模式和规律,进而对新数据进行预测和决策^[5]。近年来,由于AI在医学领域中的重大发展和技术突破,医学图像处理、计算机辅助诊疗、疾病预测、术后评估等ML模型在颈椎病的诊疗中不断更迭和应用,笔者通过综述该方面的相关应用进展,对其发展前景和局限性进行展望和评价,旨在为颈椎病的个体化诊疗和精准医疗提供更多可参考的AI方案。

1 名词概览

ML最初由计算机科学家 Arthur Samuel 于1959年提出,旨在应用计算机运算能力阐释统计学不能预测的模式和规律^[6]。随着技术的更迭和商业化发展,从20世纪80年代开始,ML与医学逐渐融合,ML

【收稿日期】2024-08-18

【基金项目】国家重点研发计划(2021YFC1712802);甘肃省联合科研基金(23JRRA1519);赵继荣甘肃省名中医传承工作室项目

【作者简介】杨文通,博士研究生,研究方向:中医药治疗脊柱疾病, E-mail: 2239578929@qq.com

【通信作者】赵继荣,教授,博士生导师,研究方向:中医药治疗脊柱疾病, E-mail: zhaojirong0709@163.com

更注重模型的预测性能和算法不断改良,以解决更加复杂的医学问题^[7]。近年来,ML模型在医学中的应用出现井喷式发展态势,尤其在外科手术、医学图像分割、肿瘤学、血液学、病理学以及药理学、基因组学和遗传组学等医学领域均有良好的应用案例^[8-13]。

ML是利用计算机不同的学习算法,通过开发最能代表输入数据的算法模型,训练和验证该模型的性能,并对新数据和新情况进行预测和判断的一种学习方法^[14]。与统计学分析方法相比,ML对输入的数据无线性要求,无需对缺失的数据进行事前填补,充分利用变量之间的交互效应和非线性关系,更加真实反映数据特征^[15]。根据训练数据是否拥有标签,ML的学习任务主要分为监督学习和无监督学习两类,分类和回归是监督学习的特点,无监督学习的特点则是聚类^[16]。监督学习利用带有标签的训练集数据通过学习得出分类的规律,最后在测试集中进行结果预测,监督学习常见的算法包括随机森林(Random Forest, RF)、支持向量机(Support Vector Machine, SVM)、逻辑回归(Logistic Regression, LR)、决策树(Decision Tree, DT)、额外树(Extra Trees, ET)、K-最邻近(K-Nearest Neighbors, K-NN)、梯度提升机(Gradient Boosting Machine, GBM)和人工神经网络等^[17]。然而,无监督学习无需事前进行标记,其根据数据的相近程度进行区分,通过学习寻找数据的联系和规律,K均值聚类、最大期望算法、主成分分析等是无监督学习的主要算法^[18]。随着计算机图像处理能力的不断提升,ML的子领域深度学习(Deep Learning, DL)应运而生。DL通过反向传播算法识别大型数据中的内部参数,利用神经网络在输入和输出层之间的“卷积层”处理数据,在处理图像、文本、语音等非结构化数据类型上更具优势^[19]。卷积神经网络(Convolutional Neural Networks, CNN)是深度学习中的关键策略,主要用于图像处理,具有强大的图像识别和特征提取能力,在医学中广泛应用^[20]。

2 ML模型在颈椎病诊断、治疗和预后中的应用

颈椎病是常见的脊柱退行性疾病,因其严重的临床症状和致残风险危害患者的身心健康,因此早期诊断和治疗非常必要^[21]。目前,核磁共振成像(Magnetic Resonance Imaging, MRI)是诊断颈椎病的“金标准”,但由于患者自身经济水平的差别,导致MRI检查难以普及,因此采用ML模型辅助MRI诊断颈椎病,可减少医疗费用的支出,降低患者的负担。X线片在颈椎病的诊疗中普及但不能作为确诊指标,ML模型的出现提高了其诊断准确率。再者,颈椎病是一种高致残率的临床疾病,对其发病原因、严重程

度、治疗方案选择及预后的预测非常有必要也十分重要,因此借助ML模型选择适合患者的治疗方案,预测和评估其预后情况同样具有重要的临床价值。

2.1 诊断模型

临床医生结合自身专业知识和临床经验,根据患者症状、体征和影像学资料综合判断是颈椎病的规范诊断模式。然而,由于无症状、早期轻微症状、个体身体状况及临床医生经验差异等原因,颈椎病诊断的及时性和准确性往往受到影响,诊断成本占比过高,更加智能、方便、无害、廉价的诊断模式为临床所需^[22]。ML模型可对临床症状、影像学检查、表面肌电信号和脑电图等数据进行特征提取、筛选和智能识别,对颈椎病做出辅助诊断。Wang等^[23]利用EasiCNCSII公司基于RF算法设计的ML模型,自动采集和识别颈椎病患者颈部肌肉的表面肌电信号,然后对这些数据进行分类和训练,以准确度、灵敏度、特异性、受试者工作特征(Receiver Operating Characteristic, ROC)曲线和曲线下面积(the Area Under the Sensitivity and Specificity Curve, AUC)等评估此模型的性能,与RF算法相比,此模型的漏诊率更低,准确度更高。脊髓型颈椎病(Cervical Spondylotic Myelopathy, CSM)致残率极高,早期诊断CSM可指导其预后,CNN作为DL模型的先进算法,在CSM的早期诊断中极具优势。Li等^[24]首先采集CSM患者的脑电图数据,采用长短期记忆网络的CNN模型对常规、轻度、重度CSM患者进行分类,然后进行训练和交叉验证,该模型实现了对CSM的分类诊断,诊断性能良好。X线是诊断颈椎病最基本的影像学检查,在临床应用中最为普及,但由于其摄影原理的限制,不能作为确诊颈椎病的辅助检查,而ML模型正好可提升其诊断性能。Lee等^[25]通过颈椎X线片构建CNN模型,使用ROC分析并计算AUC,结果表明该模型诊断CSM的准确率达到87.1%,AUC为0.864,提示基于颈椎X线片的CNN模型可作为协助临床医生诊断CSM的指标,可在一定程度上减少MRI的使用频率,节省医疗成本。另有学者也开发了基于颈椎X线片诊断颈椎病的CNN模型,准确率为89.7%,优于传统临床医生手动诊断的准确率68.3%,ML模型不仅可以增强临床医生诊断颈椎病的能力,也可提高诊断的准确率和诊断效率^[26]。MRI是颈椎病的主要确诊指标,尤其是MRI T₂加权成像可清楚显示椎间盘、神经根和脊髓的受压情况,近年来的研究表明,ML可对颈椎病脊髓和神经根病变区域进行精准定位,CNN模型可自动检测、标记椎体序列^[27]。徐刚等^[28]对317例CSM患者MRI T₂WI成像使用递归特征消除进行筛选,使用LR、SVM、自适应

增强机、贝叶斯算法构建ML模型,以ROC和AUC评估模型性能,结果发现SVM和LR两种算法对CSM的分级性能最优,以上ML算法模型可作为CSM危险度分级的术前诊断参考。综上可知,经典模型RF、LR、SVM在颈椎病诊断中具有明显优势,在此基础上开发具有更高诊断性能和效率的新模型,是ML的发展前沿,而CNN是提取和分类脑电图、表面肌电信号、X线片、MRI等临床数据最先进、最高效的算法模型,具有良好的应用前景。

2.2 治疗决策模型

颈椎病的治疗是临床难题,误诊率高、随访率低、病例数据非结构化是颈椎病诊断过程中的难点,ML模型可依据临床数据的特征进行分类和识别,结合颈椎病患者的临床症状、体征和影像学检查可对其做出更精准的诊断,给出个体化治疗方案^[29-30]。Hopkins等^[31]对CSM患者MRI图像按照椎体高度、椎管矢状面宽度等解剖学特征进行脊髓压迫程度分级,通过构建深度神经网络(Deep Neural Network, DNN)模型,使用交叉验证对训练集和测试集进行重复训练和测试,以准确度、敏感性、特异性和预测值评估模型性能,结果表明该模型预测CSM的交叉验证准确率为86.5%、中位准确率为90%,预测CSM患者改良日本骨科协会下腰痛评分(modified Japanese Orthopedic Association, mJOA)的平均误差在0.4分以内,以上预测结果为CSM的治疗提供了准确的评估价值。Zhang等^[32]采集50例CSM患者的临床表现和弥散加权MRI数据,构建K-NN聚类分析模型,得出在颈部疼痛、神经功能、生活质量、血管源性水肿等方面具有差异的疾病表型,这项研究结果可用于评估CSM的严重程度分级和术前状况。

颈椎病治疗方案的选择通常依据患者病情的严重程度,根据患者的临床症状、体征及影像学检查结果精准地给出治疗方案。ML模型因其出色的分类和预测性能被广泛应用于医疗决策中,其通过处理大样本复杂的临床数据,使医疗决策更加高效^[33]。保守疗法和手术疗法在颈椎病的治疗决策中各有优劣,对于手术疗法中选择前路手术或后路手术存有争议,而ML算法可提供有效而准确的预测^[31]。Park等^[34]建立基于RF和极端梯度提升的ML算法模型用于CSM患者的治疗决策,结果表明mJOA评分和中枢运动传导时间是选择保守疗法和手术疗法的关键变量,RF和极端梯度提升的AUC值分别为0.94和0.93,水平计数是对前路手术和后路手术进行分类的主要变量,年龄、BMI、椎间盘退变程度和颈痛程度是RF和极端梯度提升两种模型中的共同变量,这与

Rhee等^[35]的研究结果一致。Yoshimatsu等^[36]的多变量逻辑回归算法模型发现,病程是决定保守疗法或手术疗法的首要因素,这对上述研究者的结论起到了补充作用。在保守治疗措施的选择中,ML模型也有应用。Hwang等^[37]对229名颈椎病患者颅颈角、颈部疼痛问卷建立K-均值聚类算法模型,分析包括年龄、性别、静息时颅颈角等7个特征,结果表明回缩运动模式可改善下颈椎伸展和上颈椎屈曲,牵伸运动模式可改善颈椎牵伸活动度和防止颈椎过度回缩,这为颈椎病患者选择个体化运动措施有指导意义。Jiménez-Grande等^[38]以邻里成分分析(Neighbourhood Components Analysis, NCA)、K-NN、SVM和线性判别分析头部伸直线性行走和连续头部旋转线性行走两种步态运动模式,结果表明,NCA对两种运动模式9个特征分析的准确率(86.85%)最高,对两种运动模式的选择有指导意义。另一项研究同样以NCA联合K-NN、SVM和线性判别评估上述两种步态运动的疗效,结果发现NCA对非线性步态运动的分析准确率达90%,可作为步态运动模式选择的标志模型^[39]。

2.3 预后评估模型

除了对颈椎病患者临床症状评分以及治疗方案选择的预测,ML模型还可预测颈椎病患者预后情况。Zhang等^[40]开发了以拉索回归、RF、SVM及递归特征消除筛选变量的列线图模型,以ROC及AUC评估模型性能,结果表示包括MRI T₂加权成像、手术节段、术中出血量等在内的25个变量是影响手术患者额外住院天数的危险因素,这与统计学概率一致。Cabrera等^[41]利用RF算法对美国外科医师学会数据库中颈椎后路减压术患者的住院时间、再入院率、再手术率、输血和感染率等数据进行提取分析,结果发现感染率、住院时间等是围手术期的高风险因素。而对于颈椎病患者颈部疼痛强度(Visual Analogue Scale, VAS)、颈椎活动范围、颈部残疾指数(Neck Disability Index, NDI)以及年龄、BMI、体围、计算机使用时长等数据使用K-NN算法、混淆矩阵进行评估,结果显示NDI评分是影响颈椎病预后最主要的危险因素,这展现了ML模型在解决多组临床数据中的优势和性能^[42]。Zhang等^[43]发现SVM算法结合MRI弥散加权成像可预测CSM手术后长期随访中恢复情况,预测准确率达90.5%。而Zhang等^[44]的MRI T₂WI成像结合ML的预测模型中认为Delong检验(尤其是一阶方差)是为CSM预后提供主要价值的预测模型。面对不同算法在颈椎病预后的价值,Park等^[45]集合了LR、SVM、DT、RF、ET、K-NN、高斯朴素贝叶斯、多层感知器和极端梯度增强树等多种经典

算法模型,结果发现在颈椎病的短长期随访中,LR算法的预测精确度最高。脑结构的变化对CSM的预后具有一定的预测作用,Zhao等^[46]通过ML模型发现CSM患者初级运动皮层对颈椎椎间盘减压术后的预后预测具有临床价值。此外,ML模型还可以预测牵引、推拿等干预措施对颈椎病患者预后情况的作用,这有助于制定符合患者个体化特征的治疗策略^[47-48]。总的来说,ML模型在预测mJOA等临床评分、治疗措施、脑结构变化、危险因素等对预后影响体现出算法强大的预测性能,对临床治疗具有指导意义。

3 讨论

近年来,随着ML模型在医学领域中的应用呈井喷式增长,其对颈椎病诊断、治疗和预后的辅助突出越来越重要的临床价值。在以脊髓型颈椎病为主要类型的颈椎病诊断方面,ML可辅助X线片提高其诊断准确率,自动识别和分析MRI图像特征,对颈椎病危险度进行分级,为下一步的治疗和预后提供参考信息,这对减轻患者医疗成本和提高临床医生的疾病诊断能力具有重要意义。其次,ML模型还可帮助临床医生选择更适合患者的治疗方案,如保守疗法和手术疗法的抉择、颈椎前路手术和后路手术的抉择、运动模式的抉择等等。再者,ML模型可通过各种临床症状评分、危险因素、治疗措施等数据预测颈椎病患者的预后情况,这同样有助于为临床医生提供影响治疗方案实施的信息,提前预测风险和危险程度,以更有效地规避诊疗风险,为患者提供高效的个性化诊疗方案。

然而,ML模型在颈椎病诊断、治疗和预后中的应用处于起步阶段,还存在一定程度的局限性,需要进一步研究并完善。颈椎病的分型较多,ML模型主要应用于脊髓型颈椎病的诊疗和预测中,对于其他分型颈椎病的研究相对缺乏,虽说脊髓型颈椎病致残率最高,但对其他分型颈椎病的研究同样具有科学意义,符合个体化诊疗的要求,因此未来的研究中应增加ML模型在颈椎病中的应用范围。在相关模型筛选和优化的过程中,存在临床样本量较少的问题,这限制了模型验证的效果,在今后的研究中应进行大样本、多中心的数据分析和模型验证。此外,更多的研究仅限制于模型的开发等基础研究的范围,对于ML模型的临床应用和转化缺乏标准化、规范化指南和专家共识,建立可应用于颈椎病诊疗和预测的疾病模型是未来研究的前景所在,也可能成为颈椎病患者个性化诊疗的福音。

【参考文献】

- [1] 岳寿伟,魏慧,邵山. 颈椎病评估与康复治疗进展[J]. 中国康复医学杂志, 2019, 34(11): 1273-1277.
Yue SW, Wei H, Shao S. Evaluation and rehabilitation of cervical spondylosis[J]. Chinese Journal of Rehabilitation Medicine, 2019, 34(11): 1273-1277.
- [2] Global Burden of Disease Study 2013 Collaborators. Global, regional, and national incidence, prevalence, and years lived with disability for 301 acute and chronic diseases and injuries in 188 countries, 1990-2013: a systematic analysis for the global burden of disease study 2013[J]. Lancet, 2015, 386(9995): 743-800.
- [3] Lü YW, Tian W, Chen DF, et al. The prevalence and associated factors of symptomatic cervical spondylosis in Chinese adults: a community-based cross-sectional study[J]. BMC Musculoskelet Disord, 2018, 19(1): 325.
- [4] Wang CL, Tian FM, Zhou YJ, et al. The incidence of cervical spondylosis decreases with aging in the elderly, and increases with aging in the young and adult population: a hospital-based clinical analysis[J]. Clin Interv Aging, 2016, 11: 47-53.
- [5] Lip GY, Nieuwlaat R, Pisters R, et al. Refining clinical risk stratification for predicting stroke and thromboembolism in atrial fibrillation using a novel risk factor-based approach: the euro heart survey on atrial fibrillation[J]. Chest, 2010, 137(2): 263-272.
- [6] Nguyen DH, Patrick JD. Supervised machine learning and active learning in classification of radiology reports[J]. J Am Med Inform Assoc, 2014, 21(5): 893-901.
- [7] Lucchi A, Marquez-Neila P, Becker C, et al. Learning structured models for segmentation of 2-D and 3-D imagery[J]. IEEE Trans Med Imaging, 2015, 34(5): 1096-1110.
- [8] Salgado CM, Vieira SM, Mendonça LF, et al. Ensemble fuzzy models in personalized medicine: application to vasopressors administration[J]. Eng Appl Artif Intell, 2016, 49: 141-148.
- [9] Holzinger A. Trends in interactive knowledge discovery for personalized medicine: cognitive science meets machine learning[J]. IEEE Intell Inform Bull, 2014, 15(1): 6-14.
- [10] Summers RM, Yao JH, Pickhardt PJ, et al. Computed tomographic virtual colonoscopy computer-aided polyp detection in a screening population[J]. Gastroenterology, 2005, 129(6): 1832-1844.
- [11] Esteve A, Kuprel B, Novoa RA, et al. Dermatologist-level classification of skin cancer with deep neural networks[J]. Nature, 2017, 542(7639): 115-118.
- [12] Stanfield Z, Coşkun M, Koyutürk M. Drug response prediction as a link prediction problem[J]. Sci Rep, 2017, 7: 40321.
- [13] Kirchmair J, Göller AH, Lang D, et al. Predicting drug metabolism: experiment and/or computation?[J]. Nat Rev Drug Discov, 2015, 14(6): 387-404.
- [14] Swanson K, Wu E, Zhang A, et al. From patterns to patients: advances in clinical machine learning for cancer diagnosis, prognosis, and treatment[J]. Cell, 2023, 186(8): 1772-1791.
- [15] 徐嘉昕,钱凯,蒋立虹. 机器学习算法在肺癌临床诊断及生存预后分析中的应用[J]. 中国胸心血管外科临床杂志, 2022, 29(6): 777-781.
Xu JX, Qian K, Jiang LH. Application of machine learning algorithm in clinical diagnosis and survival prognosis analysis of lung cancer[J]. Chinese Journal of Clinical Thoracic and Cardiovascular Surgery, 2022, 29(6): 777-781.
- [16] Lee SH, Jang HJ. Deep learning-based prediction of molecular cancer biomarkers from tissue slides: a new tool for precision oncology[J]. Clin Mol Hepatol, 2022, 28(4): 754-772.
- [17] Choi RY, Coyner AS, Kalpathy-Cramer J, et al. Introduction to machine learning, neural networks, and deep learning[J]. Transl Vis Sci Technol, 2020, 9(2): 14.
- [18] van Leeuwen KG, Schalekamp S, Rutten MJ, et al. Artificial intelligence in radiology: 100 commercially available products and their scientific evidence[J]. Eur Radiol, 2021, 31(6): 3797-3804.
- [19] LeCun Y, Bengio Y, Hinton G. Deep learning[J]. Nature, 2015, 521(7553): 436-444.
- [20] Bera K, Schalper KA, Rimm DL, et al. Artificial intelligence in digital pathology-new tools for diagnosis and precision oncology[J]. Nat Rev Clin Oncol, 2019, 16(11): 703-715.

- [21] Fehlings MG, Tetreault LA, Riew KD, et al. A clinical practice guideline for the management of degenerative cervical myelopathy: introduction, rationale, and scope [J]. *Global Spine J*, 2017, 7(3 Suppl): 21S-27S.
- [22] Yu XH, Liu M, Meng LZ, et al. Classifying cervical spondylosis based on X-ray quantitative diagnosis [J]. *Neurocomputing*, 2015, 165: 222-227.
- [23] Wang NN, Huang X, Rao Y, et al. A convenient non-harm cervical spondylosis intelligent identity method based on machine learning [J]. *Sci Rep*, 2018, 8(1): 17430.
- [24] Li S, Yang BH, Dou YB, et al. Aided diagnosis of cervical spondylotic myelopathy using deep learning methods based on electroencephalography [J]. *Med Eng Phys*, 2023, 121: 104069.
- [25] Lee GW, Shin H, Chang MC. Deep learning algorithm to evaluate cervical spondylotic myelopathy using lateral cervical spine radiograph [J]. *BMC Neurol*, 2022, 22(1): 147.
- [26] Xie Y, Nie YL, Lundgren J, et al. Cervical spondylosis diagnosis based on convolutional neural network with X-ray images [J]. *Sensors (Basel)*, 2024, 24(11): 3428.
- [27] Forsberg D, Sjöblom E, Sunshine JL. Detection and labeling of vertebrae in MR images using deep learning with clinical annotations as training data [J]. *J Digit Imaging*, 2017, 30(4): 406-412.
- [28] 徐刚, 陈鹏, 李宇龙, 等. 基于MRI影像组学机器学习模型在脊髓型颈椎病危险度分级中的价值 [J]. *磁共振成像*, 2024, 15(4): 50-55.
Xu G, Chen P, Li YL, et al. Study on the ability to grade the risk of cervical spondylotic myelopathy by using machine learning model based on MRI radiomics [J]. *Chinese Journal of Magnetic Resonance Imaging*, 2024, 15(4): 50-55.
- [29] Singh H, Meyer AN, Thomas EJ. The frequency of diagnostic errors in outpatient care: estimations from three large observational studies involving US adult populations [J]. *BMJ Qual Saf*, 2014, 23(9): 727-731.
- [30] Khan O, Badhiwala JH, Grasso G, et al. Use of machine learning and artificial intelligence to drive personalized medicine approaches for spine care [J]. *World Neurosurg*, 2020, 140: 512-518.
- [31] Hopkins BS, Weber KA, Kesavabhotla K, et al. Machine learning for the prediction of cervical spondylotic myelopathy: a post Hoc pilot study of 28 participants [J]. *World Neurosurg*, 2019, 127: e436-e442.
- [32] Zhang JK, Javeed S, Greenberg JK, et al. Diffusion basis spectrum imaging identifies clinically relevant disease phenotypes of cervical spondylotic myelopathy [J]. *Clin Spine Surg*, 2023, 36(3): 134-142.
- [33] Rubinger L, Gazendam A, Ekhtiari S, et al. Machine learning and artificial intelligence in research and healthcare [J]. *Injury*, 2023, 54 (Suppl 3): S69-S73.
- [34] Park D, Cho JM, Yang JW, et al. Classification of expert-level therapeutic decisions for degenerative cervical myelopathy using ensemble machine learning algorithms [J]. *Front Surg*, 2022, 9: 1010420.
- [35] Rhee JM, Shamji MF, Erwin WM, et al. Nonoperative management of cervical myelopathy: a systematic review [J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2013, 38(22 Suppl 1): S55-S67.
- [36] Yoshimatsu H, Nagata K, Goto H, et al. Conservative treatment for cervical spondylotic myelopathy. Prediction of treatment effects by multivariate analysis [J]. *Spine J*, 2001, 1(4): 269-273.
- [37] Hwang UJ, Kwon OY, Kim JH. Unsupervised machine learning for clustering forward head posture, protraction and retraction movement patterns based on craniocervical angle data in individuals with nonspecific neck pain [J]. *BMC Musculoskelet Disord*, 2024, 25 (1): 376.
- [38] Jiménez-Grande D, Farokh Atashzar S, Devecchi V, et al. A machine learning approach for the identification of kinematic biomarkers of chronic neck pain during single- and dual-task gait [J]. *Gait Posture*, 2022, 96: 81-86.
- [39] Jiménez-Grande D, Farokh Atashzar S, Martinez-Valdes E, et al. Kinematic biomarkers of chronic neck pain measured during gait: a data-driven classification approach [J]. *J Biomech*, 2021, 118: 110190.
- [40] Zhang B, Huang SS, Zhou CX, et al. Prediction of additional hospital days in patients undergoing cervical spine surgery with machine learning methods [J]. *Comput Assist Surg (Abingdon)*, 2024, 29(1): 2345066.
- [41] Cabrera A, Bouterse A, Nelson M, et al. Use of random forest machine learning algorithm to predict short term outcomes following posterior cervical decompression with instrumented fusion [J]. *J Clin Neurosci*, 2023, 107: 167-171.
- [42] Khanum F, Khan AR, Khan A, et al. Predicting mechanical neck pain intensity in computer professionals using machine learning: identification and correlation of key features [J]. *Front Public Health*, 2024, 12: 1307592.
- [43] Zhang JK, Jayasekera D, Javeed S, et al. Diffusion basis spectrum imaging predicts long-term clinical outcomes following surgery in cervical spondylotic myelopathy [J]. *Spine J*, 2023, 23(4): 504-512.
- [44] Zhang MZ, Ouyang HQ, Liu JF, et al. Predicting postoperative recovery in cervical spondylotic myelopathy: construction and interpretation of T₂*-weighted radiomic-based extra trees models [J]. *Eur Radiol*, 2022, 32(5): 3565-3575.
- [45] Park C, Mummaneni PV, Gottfried ON, et al. Which supervised machine learning algorithm can best predict achievement of minimum clinically important difference in neck pain after surgery in patients with cervical myelopathy? A QOD study [J]. *Neurosurg Focus*, 2023, 54(6): E5.
- [46] Zhao R, Guo X, Wang Y, et al. Functional MRI evidence for primary motor cortex plasticity contributes to the disease's severity and prognosis of cervical spondylotic myelopathy patients [J]. *Eur Radiol*, 2022, 32(6): 3693-3704.
- [47] Moustafa IM, Ozsahin DU, Mustapha MT, et al. Utilizing machine learning to predict post-treatment outcomes in chronic non-specific neck pain patients undergoing cervical extension traction [J]. *Sci Rep*, 2024, 14(1): 11781.
- [48] Guillén D, Guekos A, Graf N, et al. Limited prognostic value of pain duration in non-specific neck pain patients seeking chiropractic care [J]. *Eur J Pain*, 2022, 26(6): 1333-1342.

(编辑:薛泽玲)