

Research progresses of radiomics for neuroblastoma in children

YAN Ren¹, YANG Chunyan², CHEN Yuankai^{1*}

(1. Department of Radiology, Guangzhou Women and Children's Medical Center, Guangzhou Medical University, Guangzhou 510623, China; 2. Department of Medical Imaging, Wusheng People's Hospital, Guang'an 638400, China)

[Abstract] Neuroblastoma (NB) is one of the common extracranial solid tumors in children, characterized by high heterogeneity, poor prognosis and high mortality. In recent years, radiomics has demonstrated significant value in early diagnosis and differential diagnosis of NB, as well as in evaluation of its pathological classification, risk stratification, tumor biomarkers and prognosis, providing a reference for formulating individualized diagnosis and treatment strategies. Research progresses of radiomics for NB in children were reviewed in this article.

[Keywords] neuroblastoma; child; radiomics

DOI:10.13929/j.issn.1003-3289.2026.03.032

影像组学用于儿童神经母细胞瘤研究进展

颜仁¹, 杨春燕², 陈元凯^{1*}

(1. 广州医科大学附属妇女儿童医疗中心放射科, 广东 广州 510623; 2. 武胜县人民医院医学影像科, 四川 广安 638400)

[摘要] 神经母细胞瘤(NB)是儿童常见颅外实体肿瘤之一,具有异质性强、预后差及死亡率高等特点。近年来,影像组学在早期诊断与鉴别诊断 NB,评估其病理类型、危险分层、肿瘤标志物及预后方面发挥重要作用,为制定个体化诊疗策略提供了参考依据。本文就影像组学用于儿童 NB 研究进展进行综述。

[关键词] 神经母细胞瘤; 儿童; 影像组学

[中图分类号] R734.9; R445 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1003-3289(2026)03-0475-04

神经母细胞瘤(neuroblastoma, NB)为儿童常见颅外实体肿瘤,占儿童恶性肿瘤 10%、儿童肿瘤相关死亡 15%左右,约 90%患儿于 5 岁前明确诊断^[1-2]。儿童 NB 可发生于任意有交感神经节细胞的部位,以肾上腺髓质最常见、其次是椎旁交感神经节,临床表现因肿瘤部位和分期而异,常见腹部肿块、腹胀、骨痛、发热及体质量减轻等,复发率及死亡率较高^[3-4]。NB 具有高度遗传和分子异质性,例如 MYCN 基因扩增与肿瘤高侵袭性和不良预后密切相关^[5]。影像组学可于医学影像图像中提取大量定量特征,精准表征肿瘤异质性、侵袭能力等生物学行为及潜在分子表型,为制定个体化诊疗策略提供科学依据^[6-7]。本文就影像组学

用于儿童 NB 研究进展进行综述。

1 鉴别诊断

近 1/3 儿童 NB 起源于肾上腺,与儿童最常见肾脏肿瘤——肾母细胞瘤(Wilms tumor, WT)鉴别困难;二者均以腹部肿块为典型症状,但疾病进展与治疗方案不同,早期精准鉴别诊断具有重要临床意义。KOSKA 等^[8]基于 57 例 NB、90 例 WT 患儿临床资料及 CT 特征构建临床-CT 影像组学联合模型,其鉴别 NB 与 WT 的准确率、F1 分数及受试者工作特征曲线的曲线下面积(area under the curve, AUC)分别为 0.93、0.94 及 0.96。

节细胞神经母细胞瘤(ganglioneuroblastoma,

[第一作者] 颜仁(1997—),女,湖南衡阳人,本科,主管技师。研究方向:儿童影像及影像技术学。E-mail: 923913138@qq.com

[通信作者] 陈元凯,广州医科大学附属妇女儿童医疗中心放射科,510623。E-mail: 76433293@qq.com

[收稿日期] 2025-06-27 **[修回日期]** 2025-11-11

GNB)亦为儿童常见颅外实体肿瘤,好发于腹膜后。NB与GNB发病年龄、临床症状及生化指标高度相似,但二者恶性程度差异显著、GNB预后更佳,传统影像学检查区分腹膜后NB与GNB效能不足^[9]。既往研究^[10]纳入172例儿童腹膜后NB及48例儿童腹膜后GNB,通过提取并筛选平扫及增强扫描动、静脉期CT图像影像组学特征分别构建单期及三期联合影像组学模型,结果显示各模型均有助于鉴别诊断儿童腹膜后NB与GNB,以联合模型效能最优(AUC为0.827~0.861)。通过影像组学鉴别诊断儿童NB与其他疾病的研究大多样本量较小,或未进行多中心研究验证模型有效性、稳定性及可重复性。

2 病理分型及危险分层

NB组织病理分型与其预后密切相关。临床常综合依据患儿年龄、肿瘤组织病理分型、分化程度及核分裂-核碎裂指数(mitosis-karyorrhexis index, MKI)将NB分为预后良好型与预后不良型,前者生存率远高于后者^[11]。WANG等^[12]基于297例NB患儿构建逻辑回归(logistic regression, LR)影像组学模型预测国际神经母细胞瘤病理学分类(international neuroblastoma pathology classification, INPC)效能尚好,其在验证集的敏感度、特异度、准确率及AUC分别为79.3%、77.8%、78.7%及0.816。QIAN等^[13]纳入106例经病理证实的NB患儿,分别构建临床模型、¹⁸F-FDG PET/CT影像组学模型及联合模型用于预测其INPC,结果显示联合模型预测效能显著优于临床模型(敏感度89.5% vs. 78.9%,特异度91.7% vs. 58.3%,准确率90.3% vs. 71.0%,AUC 0.908 vs. 0.803)。

NB危险分层常采用儿童肿瘤研究组(Children's Oncology Group, COG)和国际神经母细胞瘤风险组(International Neuroblastoma Risk Group Staging System, INRGSS)标准^[14-15];前者根据患儿年龄、DNA倍性等指标将NB分为低、中、高危三类;后者则依据组织病理类型、MYCN基因状态等因素进一步细分为极低、低、中和高危四类。但COG及INRGSS标准均涉及侵入性操作。有学者^[16]回顾性分析113例NB患儿治疗前原发灶超声图像,从中提取影像组学特征联合临床资料及超声表现构建的模型预测NB危险分层的敏感度、特异度、准确率及AUC分别为80.0%、84.2%、82.4%及0.895。也有研究^[17-18]构建¹⁸F-FDG PET/CT影像组学模型及¹⁸F-FDG PET/MRI影像组学模型预测儿童NB INRGSS标准危险分层,所获效能均良好,提示影像组学模型作为无创评

估NB危险度分组的手段,具有较大应用潜力。

3 评估肿瘤生物学标志物

MYCN基因扩增可致NB早期进展、治疗难度增大,完善相关检测对预测儿童NB预后具有重要意义。传统基因检测方法有创且操作复杂。影像组学的发展为无创、便捷预测基因状态提供了新的思路。QIAN等^[5]基于儿童NB¹⁸F-FDG PET/CT构建的临床-影像-影像组学联合模型评估MYCN基因扩增的效能良好,在训练集和验证集的AUC分别为0.860及0.824,且模型拟合优度及临床净收益均良好。WU等^[19]构建的CT影像组学模型评估NB患儿MYCN基因扩增状态的AUC为0.91~0.95,亦展现出较高临床净收益。GHOSH等^[20]基于NB患儿MRI影像组学特征分别构建LR、支持向量机(support vector machine, SVM)及随机森林(random forest, RF)模型,发现SVM模型预测MYCN基因扩增的AUC高于LR及SVM模型(依次为0.78、0.75、0.75),初步证实MRI影像组学预测儿童NB MYCN基因扩增具有可行性,但其预测效能不及CT、PET/CT影像组学模型^[5,19];未来需进一步探索MRI特征与遗传标志物的相关性。

MKI可反映NB肿瘤细胞生长活跃度。CHEN等^[21]将246例NB患儿分为低MKI、中MKI及高MKI组,并按8:2比例划分训练集与测试集,其基于动脉期CT构建的三分类影像组学模型预测低MKI、中MKI及高MKI的AUC分别为0.873、0.860及0.820,展现出良好预测效能。FENG等^[22]基于102例NB患儿临床资料及¹⁸F-FDG PET/CT影像组学特征构建的机器学习模型预测NB MKI状态的AUC高达0.951~0.988,表明PET/CT影像组学可无创预测儿童NB MKI状态。

1p和11q染色体变异是NB重要生物学标志物,与NB进展及预后密切相关^[23]。QIAN等^[24]基于儿童NB构建的¹⁸F-FDG PET/CT影像组学模型预测训练集和测试集1p和11q染色体变异的AUC分别为0.85及0.84,联合临床和影像学特征后AUC更提升至0.88~0.89,有利于NB分期及危险分层。WANG等^[25]纳入87例确诊NB并接受1p36和11q23位点阶段性染色体变异(segmental chromosomal aberrations, SCAs)基因检测的患儿,基于其三期增强CT影像组学特征构建的模型预测1p36和11q23变异的AUC为0.869~0.883,准确率为77.8%~81.7%并具有良好的校准度。

4 预测预后

4.1 骨髓转移 NB 常见淋巴结转移、血行转移和直接侵犯;骨髓为其常见转移部位,但诊断准确性不高^[1]。CHEN 等^[26]于 187 例经病理确诊的 NB 患儿动脉期和门静脉期增强 CT 提取 2 632 个影像组学特征,加以筛选后联合临床构建的临床-影像组学模型预测 NB 骨髓转移效能良好(AUC=0.93、0.91)。LV 等^[27]基于 NB 患儿 MRI 影像组学特征构建 13 种机器学习模型,其中以 RF 模型预测 NB 骨髓转移效能最高,其在训练集和验证集的 AUC 分别为 0.90 及 0.82,提示影像组学对评估 NB 骨髓转移具有潜力,有助于制定个体化治疗策略。

4.2 生存期 影像组学对于预测 NB 生存期具有重要意义。WANG 等^[28]构建 CT 影像组学模型以预测 NB 患儿无进展生存期(progression free survival, PFS),其预测训练集 1~5 年 PFS 的 AUC 分别为 0.707、0.737、0.788、0.859 及 0.829,在测试集分别为 0.738、0.807、0.761、0.787 及 0.818;且校准曲线显示模型预测概率与实际结果一致性良好。一项双中心研究^[29]显示,单一门静脉期增强 CT 影像组学模型预测高危 NB 患儿 5 年生存率的效能有限,而结合神经元特异性烯醇化酶(neuron specific enolase, NSE)可在一定程度上提高模型效能(AUC 为 0.710~0.780),具有一定参考价值。

5 小结与展望

影像组学在鉴别诊断儿童 NB、病理分型、危险分层,以及观测肿瘤标志物及预测预后等方面展现出较大应用潜力,可为个体化、精准化治疗 NB 提供重要依据。但当前儿童 NB 影像组学研究仍面临一定问题:①长期预后研究不足,缺乏对 5 年以上生存率及骨髓转移之外其他转移的探索;②样本量偏小,影像数据标准化程度不足;③算法可解释性欠佳,研究结果可重复性较差。相信未来通过开展多中心合作扩大样本量、建立长期随访机制、开展前瞻性队列研究,结合深度学习技术,整合影像、临床和分子生物学等多模态数据,能够构建更为全面的评估模型,优化儿童 NB 精准诊疗体系。

利益冲突:全体作者声明无利益冲突。

作者贡献:颜仁查阅文献、撰写和修改文章;杨春燕审阅和修改文章;陈元凯指导。

[参考文献]

[1] SCHULTE J H, EGGERT A. Neuroblastoma [J]. Crit Rev

Oncog, 2015, 20(3/4):245-270.

- [2] ZHAO L, SHI L, HUANG S G, et al. Identification and validation of radiomic features from computed tomography for preoperative classification of neuroblastic tumors in children [J]. BMC Pediatr, 2023, 23(1):262.
- [3] 李司琪, 杨吉刚. 神经母细胞瘤分子影像和放射性核素治疗现状 [J]. 中国医学影像技术, 2024, 40(12):1809-1812.
- [4] 中国抗癌协会小儿肿瘤专业委员会, 中华医学会小儿外科学分会肿瘤学组. 儿童神经母细胞瘤诊疗专家共识 CCCG-NB-2021 方案 [J]. 中华小儿外科杂志, 2022, 43(7):588-598.
- [5] QIAN L D, ZHANG S X, LI S Q, et al. Predicting MYCN amplification in paediatric neuroblastoma: Development and validation of a ¹⁸F-FDG PET/CT-based radiomics signature [J]. Insights Imaging, 2023, 14(1):205.
- [6] LAMBIN P, RIOS-VELAZQUEZ E, LEIJENAAR R, et al. Radiomics: Extracting more information from medical images using advanced feature analysis [J]. Eur J Cancer, 2012, 48(4):441-446.
- [7] TOMASZEWSKI M R, GILLIES R J. The biological meaning of radiomic features [J]. Radiology, 2021, 298(3):505-516.
- [8] KOSKA I O, OZCAN H N, TAN A A, et al. Radiomics in differential diagnosis of Wilms tumor and neuroblastoma with adrenal location in children [J]. Eur Radiol, 2024, 34(8):5016-5027.
- [9] 赵玉锦, 赵蒙, 刘双婷. CT 影像学特征在鉴别儿童腹膜后节细胞神经母细胞瘤和神经母细胞瘤中的应用价值分析 [J]. 临床医学工程, 2023, 30(11):1501-1502.
- [10] 王浩入, 陈欣, 刘欢, 等. CT 影像组学鉴别儿童腹膜后神经母细胞瘤和节细胞神经母细胞瘤的价值 [J]. 南方医科大学学报, 2021, 41(10):1569-1576.
- [11] NAKAZAWA A. Biological categories of neuroblastoma based on the international neuroblastoma pathology classification for treatment stratification [J]. Pathol Int, 2021, 71(4):232-244.
- [12] WANG H, XIE M, CHEN X, et al. Radiomics analysis of contrast-enhanced computed tomography in predicting the international neuroblastoma pathology classification in neuroblastoma [J]. Insights Imaging, 2023, 14(1):106.
- [13] QIAN L D, FENG L J, ZHANG S X, et al. ¹⁸F-FDG PET/CT imaging of pediatric peripheral neuroblastic tumor: A combined model to predict the international neuroblastoma pathology classification [J]. Quant Imaging Med Surg, 2023, 13(1):94-107.
- [14] PONZONI M, BACHETTI T, CORRIAS M V, et al. Recent advances in the developmental origin of neuroblastoma: An overview [J]. J Exp Clin Cancer Res, 2022, 41(1):92.
- [15] QADIR M I, AHMED B, NOREEN S. Advances in the management of neuroblastoma [J]. Crit Rev Eukaryot Gene Expr, 2024, 34(2):1-13.
- [16] 胡家乐. 超声在儿童神经母细胞瘤危险度分期及分层中的应用研究 [D]. 沈阳:中国医科大学, 2024:1-20.
- [17] FENG L, LU X, YANG X, et al. An ¹⁸F-FDG PET/CT radiomics nomogram for differentiation of high-risk and non-

- high-risk patients of the International Neuroblastoma Risk Group Staging System[J]. *Eur J Radiol*, 2022, 154:110444.
- [18] LIANG J. The ¹⁸F-FDG PET/MRI radiomics nomogram for differentiating high-risk and non-high-risk patients of the International Neuroblastoma Risk Group Staging System[J]. *J Nucl Med*, 2023, 64(1):445.
- [19] WU H, WU C, ZHENG H, et al. Radiogenomics of neuroblastoma in pediatric patients: CT-based radiomics signature in predicting MYCN amplification[J]. *Eur Radiol*, 2021, 31(5):3080-3089.
- [20] GHOSH A, YEKELER E, TEIXEIRA S R, et al. Role of MRI radiomics for the prediction of MYCN amplification in neuroblastomas[J]. *Eur Radiol*, 2023, 33(10):6726-6735.
- [21] CHEN X, WANG H, XIA Y, et al. The relationship between contrast-enhanced computed tomography radiomics features and mitosis karyorrhexis index in neuroblastoma[J]. *Discov Oncol*, 2024, 15(1):201.
- [22] FENG L, QIAN L, YANG S, et al. Prediction for mitosis-karyorrhexis index status of pediatric neuroblastoma via machine learning based ¹⁸F-FDG PET/CT radiomics[J]. *Diagnostics*, 2022, 12(2):262.
- [23] IRWIN M S, PARK J R. Neuroblastoma: Paradigm for precision medicine[J]. *Pediatr Clin North Am*, 2015 62(1):225-256.
- [24] QIAN L, YANG S, ZHANG S, et al. Prediction of MYCN amplification, 1p and 11q aberrations in pediatric neuroblastoma via pre-therapy ¹⁸F-FDG PET/CT radiomics[J]. *Front Med (Lausanne)*, 2022, 9:840777.
- [25] WANG H, YU C, DING H, et al. Computed tomography-based radiomics signature for predicting segmental chromosomal aberrations at 1p36 and 11q23 in pediatric neuroblastoma[J]. *J Comput Assist Tomogr*, 2024, 48(3):472-479.
- [26] CHEN X, CHEN Q, LIU Y, et al. Radiomics models to predict bone marrow metastasis of neuroblastoma using CT[J]. *Cancer Innov*, 2024, 3(5):e135.
- [27] LV L, ZHANG Z, ZHANG D, et al. Machine-learning radiomics to predict bone marrow metastasis of neuroblastoma using magnetic resonance imaging[J]. *Cancer innov*, 2023, 2(5):405-415.
- [28] WANG H, LI T, XIE M, et al. Association of computed tomography radiomics signature with progression-free survival in neuroblastoma patients[J]. *Clin Oncol (R Coll Radiol)*, 2023, 35(11):e639-e647.
- [29] WANG H, YE W, LI T, et al. Integrating neuron-specific enolase and venous-phase enhanced computed tomography radiomics for improved survival prediction in high-risk neuroblastoma: A two-center study[J]. *Pediatr Radiol*, 2025, 55(6):1178-1190.