

影像组学在儿童横纹肌肉瘤诊疗中的研究进展

罗皓月, 何玲*

重庆医科大学附属儿童医院放射科, 国家儿童健康与疾病临床医学研究中心, 儿童发育疾病研究教育部重点实验室, 儿科学重庆市重点实验室, 重庆

收稿日期: 2026年1月27日; 录用日期: 2026年2月22日; 发布日期: 2026年2月28日

摘要

儿童横纹肌肉瘤(Rhabdomyosarcoma, RMS)是儿童期最常见的软组织肉瘤, 其异质性强、预后差异大, 精准诊疗仍是临床面临的重大挑战。传统影像学检查(如MRI、CT)主要提供肿瘤形态学信息, 对其内在的异质性、治疗反应早期评估及预后预测能力有限。影像组学作为一种新兴的定量分析方法, 能提供RMS的精准诊疗。

关键词

影像组学, 儿童横纹肌肉瘤, 预后预测, 疗效评估

Advances in Radiomics for the Diagnosis and Treatment of Pediatric Rhabdomyosarcoma

Haoyue Luo, Ling He*

Department of Radiology, Children's Hospital of Chongqing Medical University, National Clinical Research Center for Child Health and Disorders, Ministry of Education Key Laboratory of Child Development and Disorders, Chongqing Key Laboratory of Pediatrics, Chongqing

Received: January 27, 2026; accepted: February 22, 2026; published: February 28, 2026

Abstract

Pediatric Rhabdomyosarcoma (RMS) is the most common soft tissue sarcoma in children, characterized by significant heterogeneity and variable prognosis. Precision diagnosis and treatment remain a major clinical challenge. Conventional imaging techniques (e.g., MRI, CT) primarily provide morphological information about the tumor, with limited capability to assess its intrinsic heterogeneity, evaluate early treatment response, and predict prognosis. As an emerging quantitative analysis method, radiomics holds promise for enabling precise diagnosis and treatment of RMS.

*通讯作者。

Keywords

Radiomics, Pediatric Rhabdomyosarcoma, Prognosis Prediction, Treatment Response Assessment

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 横纹肌肉瘤的简介

横纹肌肉瘤(Rhabdomyosarcoma, RMS)是儿童最常见的软组织肉瘤, 约占所有儿童癌症的 5% [1], 最常见于两个年龄高峰: 2 和 6 岁[2]。目前, 组织学将 RMS 分为 4 型: 胚胎性横纹肌肉瘤(embryonal RMS, eRMS)、腺泡性横纹肌肉瘤(alveolar RMS, aRMS)、梭形细胞/硬化性横纹肌肉瘤(spindle cells/sclerosing RMS, ssRMS)及多形性横纹肌肉瘤(pleomorphic RMS, pRMS) [3]。不同类型横纹肌肉瘤的组织学特征、发病年龄、发病部位和预后有着很大的差异[4], RMS 早期易侵入邻近组织, 发生局部淋巴结及远处转移。病理检查是目前确诊该疾病的主要方法, 但影像学检查对于明确 RMS 的诊断与分期具有重要的临床意义。传统影像学主要提供形态学评估, 难以量化肿瘤内部的异质性[1], 而影像组学通过高通量提取和分析医学图像中的定量特征, 为 RMS 的精准诊疗提供了新范式。本文旨在综述影像组学在 RMS 诊断、分型、预后预测及疗效评估中的最新进展, 并探讨其面临的挑战与未来发展方向, 强调临床需求与影像分析的深度融合。

2. 儿童横纹肌肉瘤的主要影像学检查方式

2.1. 超声

超声作为一种常规检查, 被用于儿童局部软组织肿块、区域淋巴结的初步评估和随访监测, 因其价格较便宜、操作方便, 主要用于 RMS 肿块的初步评估和随访监测。从检查结果来看, RMS 的超声声像图无特异性, 表现为不均匀低至中等回声, 出血、钙化罕见, 肿瘤血流信号丰富。

2.2. 计算机断层扫描(CT)

CT 是肿瘤性病变的常规检查之一, 可全面显示 RMS 病灶的大小、位置及范围, 对于检测骨质破坏更敏感。常用于评估肺部转移, 多结节融合、周围血管、不均匀渐进性向心性强化的 CT 特征对儿童盆腔 RMS 的诊断价值最大。低于肌肉密度、坏死、无钙化、无出血的 CT 征象是诊断儿童骨盆 RMS 的有效影像学特征, 具有较高的特异性[5]。

2.3. 磁共振成像(Magnetic Resonance Imaging, MRI)

MRI 是评估肿瘤特征及与周围组织关系的首选方式[6], 也是评价 RMS 局部浸润和区域淋巴结肿大的首选成像方法。T1WI、T2WI、增强及功能序列(如 DWI, DSC/DCE)能清晰显示肿瘤的解剖位置、侵犯范围、与神经血管的关系, 并提供初步的细胞密度和血供信息。动态对比增强 MRI 可帮助判断病变强化特征及性质。

2.4. PET-CT 和 PET-MR

PET-CT 和 PET-MR 是结合了代谢和解剖成像的功能成像方式, 对于检出淋巴结受累和远处转移具

有更高的敏感性, 提高了儿童 RMS 分期的准确率。以 ^{18}F -FDG PET-CT 为核心, 其可更好地反映 RMS 的影像特点及其内部生物化学信息, 是分期和再分期的关键工具[7]。通过标准化摄取值反映肿瘤的代谢活性, 是评估全身转移、引导活检和早期疗效监测的重要手段。

3. 影像组学的介绍

影像组学是定量图像分析中的一个新兴领域, 旨在将大规模提取的影像信息与临床和生物学终点联系起来[8]。机器和深度学习作为一种主要的计算工具, 在基于影像组学特征或分类器的高级模型构建中起到关键作用。影像组学和深度学习作为新兴的人工智能方法, 能够从 CT、MRI 等常规医学影像中高容量提取人眼无法识别的定量特征, 或通过深度神经网络自动学习特征, 用于预测肿瘤生物学行为。影像组学通过将医学图像转化为可视化数据, 建立从影像特征到临床决策的桥梁, 有望在无创、动态、全面的层面上, 提升对 RMS 生物学行为的理解, 从而实现患者的个性化管理和治疗。

4. 影像组学在儿童 RMS 中的临床应用研究进展

4.1. 影像组学在肿瘤鉴别与分型的应用

有研究将儿童横纹肌样瘤(RT)的 CT 和 MR 影像学特征与横纹肌肉瘤的比较, 指出边缘不明确与钙化是独立鉴别两者的重要因素[9]。另有研究建立了有效模型以区分软组织横纹肌肉瘤与神经母细胞瘤[10], 此外, 基于 CT 及 MRI 的纹理特征被证实可用于区分 RMS 和卵黄囊瘤[11]。在 RMS 亚型鉴别方面, 研究发现 ARMS 在 T2WI 图像上呈现更高的不均匀性和更复杂的纹理特征; 同时, 多组学研究证实 ARMS 与 ERMS 在分子通路上具有本质差异[12]。有研究结果指出, 在儿童肉瘤分期检查, 肿瘤体积与 ADC 值、SUV 值之间存在显著的相关性, 平均值与中位值的关联尤为明显[13]。近年来, 半自动肿瘤体积测量方法的应用进一步提高了评估效率与准确性[14], 为临床实践带来了便利。

值得关注的是, 在影像组学方法学层面, 多项研究采用了不同技术路径进行分析。例如, 有研究基于 T2 加权 MRI 影像组学预测儿童与青少年横纹肌肉瘤的肺泡亚型及远处转移[15]。在 PET/MR 相关研究则从 ADC 图中提取一阶特征以区分不同级别病变[13], 其降维方法多采用主成分分析(PCA)或最小冗余最大相关(mRMR)算法; 另有研究从 T2WI 图像提取放射组学特征, 实现对儿童软组织肉瘤不同级别和亚型的区分[16]。总体来看, 现有研究在影像组学流程上尚未形成统一的标准化方案, 各类方法在特征稳定性、可重复性及跨中心适用性等方面仍存在一定差异, 有待进一步开展系统的横向比较与综合评价。

4.2. 影像组学在治疗评估的应用

早期、准确地评估化疗疗效对于调整治疗方案、避免无效治疗毒副作用具有重要意义。传统 RECIST 标准基于肿瘤径线变化, 存在一定滞后性, 而影像组学提供了新思路。例如, 基于基线 MRI 构建的影像组学模型可在治疗前预测肿瘤对新辅助化疗的敏感性, 从而实现疗效的早期预判[17]。再比如, 化疗 1~2 个周期后, 肿瘤体积变化可能不明显, 但其内部纹理特征已发生显著变化, 这些变化可作为早期反应标志物, 比体积缩小更早出现, 适用于早期疗效监测。Meta 分析表明, 基于影像组学及深度学习的模型在预测软组织肉瘤远处转移方面展现出良好甚至优秀的性能[18]。另有研究证实, 常规 T1 增强磁共振成像的瘤周放射组学特征能够可靠地预测儿童横纹肌肉瘤对新辅助化疗的反应, 从而在化疗早期实现有效的风险分层[19]。

4.3. 影像组学在预后预测的应用

影像组学的核心优势之一在于能将影像特征与患者的生存结局有效关联。有研究构建了结合临床分

期和影像组学特征(如肿瘤边界不规则度、内部坏死区域的纹理)的列线图模型,其预测复发风险的效能显著高于仅使用临床因素的模型,提取自 PET/CT 的代谢纹理特征与 RMS 患儿的 OS 密切相关[6]。ADC 值作为肿瘤学中的反应标志物,其直方图分析可为儿童及青少年横纹肌肉瘤提供基因型及治疗前表型信息,多项 ADC 直方图指标与患者的 TNM 分期、临床分组及风险分层显著相关[20]。

高异质性常提示肿瘤内部存在代谢活跃程度不同的细胞克隆,往往预示着更差的预后。有研究通过定量弥散加权 MRI 对横纹肌肉瘤进行疗效评估,发现在化疗三周期后,不同组织学类型和风险分组的肿瘤在基线时已表现出显著差异[21]。另有学者基于 T1 加权增强(T1CE)磁共振成像开发并验证了临床预测模型,该模型在捕捉肿瘤异质性及评估 RMS 患者生存结局方面展现出良好潜力[22]。

5. 当前挑战与局限性

儿童 RMS 属于罕见病,单中心样本量小,导致模型易过拟合,需要建立多中心、大样本、前瞻性的影像基因组学数据库。此外,由于儿童患者配合度低,图像易产生运动伪影,以及部分复杂解剖部位分割难度大,因此,必须加强图像质量控制,推动儿童专用图谱与模型的开发,并推广自动化或半自动化分割算法的应用。目前,许多机器学习模型(尤其是深度学习)仍缺乏可解释性,从影像中提取的纹理特征与肿瘤微观病理之间的生物学关联也有待进一步深入探索。

6. 总结与展望

影像组学为儿童横纹肌肉瘤的精准诊疗提供了新前景,尽管面临数据样本量较小、标准化和解释性等挑战,但随着多中心合作的深入、人工智能技术的发展,影像组学在未来将在 RMS 的诊断、治疗决策和预后中承担越来越重要的角色。未来应进一步推动多模态影像组学(如结合 DWI、DCE-MRI、PET 等)与深度学习方法的融合,利用卷积神经网络(CNN)实现端到端的特征学习与病灶自动分割,从而构建更高效、更精准的疗效预测与预后评估模型。通过持续优化,影像组学将助力实现儿童横纹肌肉瘤的“影像指导下的分层治疗”,切实提升诊疗水平。

参考文献

- [1] McCarville, M.B., Spunt, S.L. and Pappo, A.S. (2001) Rhabdomyosarcoma in Pediatric Patients: The Good, the Bad, and the Unusual. *American Journal of Roentgenology*, **176**, 1563-1569. <https://doi.org/10.2214/ajr.176.6.1761563>
- [2] Donaldson, S.S. and Belli, J.A. (1984) A Rational Clinical Staging System for Childhood Rhabdomyosarcoma. *Journal of Clinical Oncology*, **2**, 135-139. <https://doi.org/10.1200/jco.1984.2.2.135>
- [3] Rudzinski, E.R., Anderson, J.R., Hawkins, D.S., Skapek, S.X., Parham, D.M. and Teot, L.A. (2015) The World Health Organization Classification of Skeletal Muscle Tumors in Pediatric Rhabdomyosarcoma: A Report from the Children's Oncology Group. *Archives of Pathology & Laboratory Medicine*, **139**, 1281-1287. <https://doi.org/10.5858/arpa.2014-0475-oa>
- [4] Amer, K.M., Thomson, J.E., Congiusta, D., Dobitsch, A., Chaudhry, A., Li, M., et al. (2019) Epidemiology, Incidence, and Survival of Rhabdomyosarcoma Subtypes: SEER and ICES Database Analysis. *Journal of Orthopaedic Research*, **37**, 2226-2230. <https://doi.org/10.1002/jor.24387>
- [5] Tian, L., Cai, Y., Li, X. and Cai, J. (2022) Computed Tomography (CT) Features of Pelvic Rhabdomyosarcoma (RMS) in Children. *Current Medical Imaging Formerly Current Medical Imaging Reviews*, **18**, 299-304. <https://doi.org/10.2174/1573405617666210826160710>
- [6] de Vries, I.S.A., van Ewijk, R., Adriaansen, L.M.E., Bohte, A.E., Braat, A.J.A.T., Fajardo, R.D., et al. (2023) Imaging in Rhabdomyosarcoma: A Patient Journey. *Pediatric Radiology*, **53**, 788-812. <https://doi.org/10.1007/s00247-023-05596-8>
- [7] van Ewijk, R., Vaarwerk, B., Breunis, W.B., Schoot, R.A., ter Horst, S.A.J., van Rijn, R.R., et al. (2021) The Value of Early Tumor Size Response to Chemotherapy in Pediatric Rhabdomyosarcoma. *Cancers*, **13**, Article 510. <https://doi.org/10.3390/cancers13030510>
- [8] Avanzo, M., Wei, L., Stancanello, J., Vallières, M., Rao, A., Morin, O., et al. (2020) Machine and Deep Learning

- Methods for Radiomics. *Medical Physics*, **47**, e185-e202. <https://doi.org/10.1002/mp.13678>
- [9] Sheng, J., Li, T., Zhang, H., Xu, H., Cai, X., Xu, R., *et al.* (2023) CT and MR Imaging Features of Soft Tissue Rhabdoid Tumor: Compared with Rhabdomyosarcoma in Children. *Frontiers in Pediatrics*, **11**, Article 1199444. <https://doi.org/10.3389/fped.2023.1199444>
- [10] Sheng, J., Li, T., Xu, H., *et al.* (2024) Evaluation of Clinical and Imaging Features for Differentiating Rhabdomyosarcoma from Neuroblastoma in Pediatric Soft Tissue. *Frontiers in Oncology*, **14**, Article 1289532.
- [11] Chen, X., Huang, Y., He, L., Zhang, T., Zhang, L. and Ding, H. (2020) CT-Based Radiomics to Differentiate Pelvic Rhabdomyosarcoma from Yolk Sac Tumors in Children. *Frontiers in Oncology*, **10**, Article 584272. <https://doi.org/10.3389/fonc.2020.584272>
- [12] Osama, A., Karam, A., Atef, A., Arafat, M., Afifi, R.W., Mokhtar, M., *et al.* (2025) Integrative Multi-Omics Profiling of Rhabdomyosarcoma Subtypes Reveals Distinct Molecular Pathways and Biomarker Signatures. *Cells*, **14**, Article 1115. <https://doi.org/10.3390/cells14141115>
- [13] Orsatti, G., Zucchetta, P., Varotto, A., Crimi, F., Weber, M., Cecchin, D., *et al.* (2021) Volumetric Histograms-Based Analysis of Apparent Diffusion Coefficients and Standard Uptake Values for the Assessment of Pediatric Sarcoma at Staging: Preliminary Results of a PET/MRI Study. *La radiologia medica*, **126**, 878-885. <https://doi.org/10.1007/s11547-021-01340-0>
- [14] Gowin, E., Jończyk-Potoczna, K., Sosnowska-Sienkiewicz, P., Belen Larque, A., Kurzawa, P. and Januszkiewicz-Lewandowska, D. (2021) Semi-Automatic Volumetric and Standard Three-Dimensional Measurements for Primary Tumor Evaluation and Response to Treatment Assessment in Pediatric Rhabdomyosarcoma. *Journal of Personalized Medicine*, **11**, Article 717. <https://doi.org/10.3390/jpm11080717>
- [15] Ghosh, A., Li, H., Towbin, A., Turpin, B. and Trout, A. (2025) T2-Weighted MRI Radiomics for the Prediction of Pediatric and Young Adult Rhabdomyosarcoma Alveolar Subtype and Distant Metastasis: A Pilot Study. *Pediatric Radiology*, **55**, 1149-1161. <https://doi.org/10.1007/s00247-025-06205-6>
- [16] Giraud, C., Fichera, G., Stramare, R., Bisogno, G., Motta, R., Evangelista, L., *et al.* (2022) Radiomic Features as Biomarkers of Soft Tissue Paediatric Sarcomas: Preliminary Results of a PET/MR Study. *Radiology and Oncology*, **56**, 138-141. <https://doi.org/10.2478/raon-2022-0013>
- [17] Rhee, D.S., Rodeberg, D.A., Baertschiger, R.M., Aldrink, J.H., Lautz, T.B., Grant, C., *et al.* (2020) Update on Pediatric Rhabdomyosarcoma: A Report from the APSA Cancer Committee. *Journal of Pediatric Surgery*, **55**, 1987-1995. <https://doi.org/10.1016/j.jpedsurg.2020.06.015>
- [18] Mirghaderi, P., Valizadeh, P., Haseli, S., Kim, H.S., Azhideh, A., Nyflot, M.J., *et al.* (2025) Performance of Radiomics and Deep Learning Models in Predicting Distant Metastases in Soft Tissue Sarcomas: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Academic Radiology*, **32**, 6773-6795. <https://doi.org/10.1016/j.acra.2025.06.027>
- [19] Zhang, G., Peng, Y., Su, Y., Mei, L., Fang, J., Liu, Y., *et al.* (2026) Intratumoral and Peritumoral Radiomics for the Pretreatment Prediction of Response to Neoadjuvant Chemotherapy in Rhabdomyosarcoma: A Multicenter Retrospective Cohort Study. *Insights into Imaging*, **17**, Article No. 3. <https://doi.org/10.1186/s13244-025-02178-0>
- [20] Ghosh, A., Li, H., Towbin, A.J., Turpin, B.K. and Trout, A.T. (2024) Histogram Analysis of Apparent Diffusion Coefficient Maps Provides Genotypic and Pretreatment Phenotypic Information in Pediatric and Young Adult Rhabdomyosarcoma. *Academic Radiology*, **31**, 2550-2561. <https://doi.org/10.1016/j.acra.2024.01.011>
- [21] van Ewijk, R., Chatziantoniou, C., Adams, M., Bertolini, P., Bisogno, G., Bouhamama, A., *et al.* (2023) Quantitative Diffusion-Weighted MRI Response Assessment in Rhabdomyosarcoma: An International Retrospective Study on Behalf of the European Paediatric Soft Tissue Sarcoma Study Group Imaging Committee. *Pediatric Radiology*, **53**, 2539-2551. <https://doi.org/10.1007/s00247-023-05745-z>
- [22] Zhang, G., Wang, S., Su, Y., Peng, Y., Fang, J., Liu, Y., *et al.* (2025) MRI Based Intratumoral-Peritumoral Habitat Radiomics for Prediction of Overall Survival in Rhabdomyosarcoma: A Multicenter Study. *Academic Radiology*, **32**, 7407-7418. <https://doi.org/10.1016/j.acra.2025.09.016>