中国现代
普通外科进展
Chin J Curr Adv Gen Surg

2025年10月 第28卷 第10期 Oct. 2025 Vol. 28 No. 10

人工智能赋能儿童及青少年甲状腺癌个体化诊疗：现状与展望

刘冰燕 周黎光

山东第一医科大学附属省立医院 超声医学科 （山东 济南 250021）

【摘要】儿童及青少年甲状腺癌虽然发病率较低，但更具侵袭性，复发风险显著高于成人，临床管理面临独特挑战。人工智能（AI）的发展和影像学技术的进步使儿童及青少年甲状腺癌的早期诊断和精准治疗获得显著进展。本文系统综述儿童及青少年甲状腺癌的流行病学特征、诊断技术进展及个体化治疗策略，探讨AI在诊疗过程中的应用现状与挑战。

【关键词】甲状腺癌•儿童，青少年•人工智能•超声检查
【中图分类号】R736.1
【文献标识码】A DOI: 10.3969/j.issn.1009-9905.2025.10.007
【文章编号】1009-9905(2025)10-0796-05

儿童及青少年甲状腺癌因其侵袭性强、复发风险高等独特生物学特征，在临床管理中面临诸多挑战。虽然影像学的进步提高了这部分患者的早期检出率，但由于其影像异质性强、临床观察数据不足、现有指南适用性局限等原因，精准管理受到限制。人工智能（AI）技术的应用在影像分析及治疗优化方面展现出巨大潜力。本文系统综述当前AI在儿童及青少年甲状腺癌的辅助诊断、手术决策支持、放射性碘治疗优化及个体化治疗中的创新应用，为推动建立基于儿童及青少年特征的AI辅助个体化诊疗框架提供思路。

1 儿童及青少年甲状腺癌流行病学与临床特征

1.1 全球发病率趋势及流行病学特征 近年来，儿童及青少年甲状腺癌发病率在全球范围内持续攀升，一部分原因可能是医疗检测的普及提高了检出率[1]。这一推论在福岛核事故后得到验证——大规模超声筛查实践直接导致儿童甲状腺癌检出率激增，而同期死亡率仍维持在极低水平，提示过度诊断可能引发不必要的侵入性治疗并影响患儿长期生存质量[1-2]。从流行病学分布特征来看，儿童及青少年甲状腺癌存在显著地域差异性：2008~2012年的统计数据显示，乌干达、肯尼亚等非洲国家的年龄标准化发病率（ASR）为每百万人口0.4例/年，而白俄罗斯为每百万人口13.4例/年，相差约33倍[1]。不同年龄段和性别的发病率亦存在差异：青少年（15~19岁）较儿童（0~14岁）的发病率高，男女患儿比例为1∶3.42[2]。在我国，该病的增长趋势与全球多数国家一致，且存在明显的性别差异，女孩的发病率显著高于男孩，尤其是在10~19岁年龄段[1]。

1.2 儿童及青少年甲状腺癌与成人甲状腺癌的差异 儿童及青少年甲状腺癌具有独特的生物学特征和分子机制。相较于成人患者，分化性甲状腺癌（DTC）患儿初诊时多表现为更晚期的疾病状态，其甲状腺腺外侵犯、颈部淋巴结转移及肺部转移发生率均显著高于成人[3]。尽管肿瘤更具侵袭性，但长期生存率却优于成人群体[4-6]。而在分子特征方面，RET/PTC重排在儿童及青少年甲状腺癌患者常见。RET/PTC重排是一种与甲状腺癌密切相关的基因

[基金项目] 山东省自然科学基金项目（ZR2021MH309）
[通信作者] 周黎光，E-mail: zlgdor@sina.cn

重排，能够导致细胞增殖和存活信号通路的异常激活，促进肿瘤发生发展。

由于儿童及青少年甲状腺癌的发病趋势、流行病学以及生物学行为、分子特征与成人不同，使得基于成人数据建立的诊断标准和治疗方案在儿童群体中面临适配困境，迫切需要构建具有针对性的精准评估体系。AI技术因其强大的特征解析和模式识别能力，有望成为这一临床瓶颈的突破口。

2 诊断方法：从传统影像学到AI

2.1 超声检查的优势与局限性 超声检查是儿童及青少年甲状腺癌的首选影像学检查方法，具有无创、安全和高分辨率等优势。该技术通过观察结节特征和血流信号，结合甲状腺影像报告与数据系统（TI-RADS）对结节进行恶性风险评估，并能指导细针穿刺活检（fine needle aspiration biopsy，FNAB）。基于成人TI-RADS分级系统，有学者开发出适用于儿童及青少年群体的预测模型。PED TI-RADS模型通过调整结节大小阈值并强化超声形态学特征权重，降低了对结节大小的依赖，敏感性达100%，避免了28.9%的不必要FNAB[7]。然而，超声诊断准确性受操作者经验及结节影像特征重叠的影响。约44%的儿童乳头状甲状腺癌合并桥本甲状腺炎[8]，干扰了结节边界的准确评估及周围组织浸润征象的识别，增加了临床误诊与漏诊概率。

2.2 AI在儿童及青少年甲状腺癌诊断中的应用探索 超声影像的智能分析是近年来医学影像领域中的一大突破，AI技术的应用大大提高了超声图像的诊断精度和效率。有研究基于成人患者数据库构建的深度学习模型ThyNet表现出优异的诊断性能（AUROC=0.922），显著减少35.2%不必要的FNAB[9]。此外，基于深度学习的计算机辅助诊断系统通过分析超声图像中的免疫微环境特征揭示了影像特征与肿瘤生物学行为的关联性，进一步验证了AI在辅助病理分型中的应用前景[10]。在细针穿刺细胞学诊断领域，大规模全切片图像训练的深度学习模型在区分甲状腺良性结节与Bethesda Ⅲ～Ⅵ类病变中表现出色（AUROC=0.99），显著提升初级病理医生的诊断特异性（从0.887增至0.993），这为应对资深病理专家稀缺，提升初级医生诊断精度提供了可行性方案[11]。针对Bethesda Ⅲ～Ⅵ类不确定结节，研究者基于甲状腺结节的分子图谱设计了一些AI模型来预测其恶性概率，结果显示模型预测能力良好且在持续增长（AUC：0.88~094），ThyroSeq v3检测可使65.3%的阴性结节避免不必要的手术[12]，而Afirma基因分类器可以通过转录组分析辅助鉴别不确定结节[13]。

目前AI在儿童及青少年甲状腺癌诊断中的应用尚处于探索阶段，但其独特的临床需求为AI技术提供了发展空间。Yang等[14]首次在≤21岁人群中系统对比了深度学习算法与人工判读效能，发现AI模型敏感性达87.5%，显著优于放射科医生主观印象（58.3%），证实AI在筛查高风险病例方面更具优势，对病程进展更快的青少年患者具有重要临床价值。但该研究表明基于成人数据集训练的模型直接迁移至儿童及青少年患者群体时特异性骤降（36.1% *vs* 52%），原因可能在于儿童及青少年甲状腺癌具有更强的侵袭性和独特的分子特性，基于成人数据集训练的模型难以准确识别儿童及青少年良恶性结节的影像特征。同时，此研究队列中儿童及青少年恶性结节比例（40.3%）远高于成人常规人群（5%~10%），这种样本分布偏差使模型对儿童及青少年结节良性特征的学习不充分。此外，算法仅依赖单一切面的静态图像进行评估，限制了模型判别能力。因此如何通过针对性的数据预处理和模型训练使AI算法在儿童及青少年甲状腺癌的超声影像分析中更加有效成为关键。研究发现，结合多模态数据（如动态超声视频与静态图像）进行训练，能够增强模型对儿童甲状腺病变的识别能力，从而提高诊断的准确性和可靠性[14]。

3 AI在儿童及青少年甲状腺癌个体化治疗决策中的应用

3.1 AI协助优化手术方案 儿童及青少年甲状腺癌的手术治疗争议集中在甲状腺切除范围与淋巴结清扫策略。当前手术仍是甲状腺癌的首选方案，但是选择全切术还是腺叶切除术的争议持续存在。中国和美国的专家共识均推荐行全切术以降低多灶残留风险[15-16]，但也有研究显示两种术式的长期生存率比较无显著差异[17]。甲状腺全切术后最常见并发症为甲状旁腺功能减退[18]。因此，对于局限于单侧腺叶、无淋巴结转移的低危患儿，部分学者主张行腺叶切除术以平衡疗效与安全性[19]。

AI技术为术前精准评估提供新思路。Li等[20]针对儿童群体开发的LightGBM模型预测甲状腺癌腺外扩展的AUC达0.832，优于传统超声检查，该模型通过量化肿瘤形态特征（如长轴直径、小区域低灰度强调）辅助识别高危病例，可以优化手术范围决策，减少过度切除导致的并发症。在术中安全保护方面，Gong团队首创的AI驱动的术中导航系统

可实时识别喉返神经，精度达75.6%，显著降低手术损伤风险[21]。但对于儿童更精细的解剖结构，未来应通过多中心儿科手术视频数据库训练，提升AI术中神经监测与甲状旁腺保护的准确性，降低喉返神经损伤和永久性低钙血症风险[22]。

在淋巴结清扫方面，对存在腺外侵犯或明确转移的患儿行中央区淋巴结清扫（central neck dissection，CND）已达成共识，但预防性CND的获益仍存争议。美国甲状腺协会（ATA）指南基于手术风险不推荐常规预防性CND[15]，而国内指南则因儿童复发率较高推荐常规同侧CND[16]。AI或可消除这一分歧。Li等[20]的研究显示，放射组学模型对甲状腺癌腺外扩展的敏感性（79%）和特异性（78%）均高于传统超声（敏感性73%，特异性44%），为精准筛选高危病例提供了新思路。多模态影像技术的整合有望优化淋巴结转移风险评估体系，推动个体化手术方案的制定。

因此，AI辅助的手术范围预测模型在儿童及青少年甲状腺癌个体化诊疗中具有广阔前景。通过基于影像和临床特征的淋巴结转移预测、手术切除范围个性化推荐系统的开发，辅以术中神经监测数据的实时分析，能够为甲状腺癌患儿提供更为安全且有效的治疗方案，有效改善预后。

3.2　AI辅助个体化放射性碘治疗　儿童及青少年甲状腺癌的放射性碘治疗策略正朝着基于风险分层的精准化方向发展。传统观点认为术后常规行放射性碘治疗可降低复发风险。但一项队列研究显示，放射性碘治疗低风险患儿获益有限，1年缓解率与对照组比较无显著差异（70% *vs* 69%）[23]。因此治疗反应性预测模型在儿童及青少年甲状腺癌的个体化诊疗中具有临床应用价值。初步研究表明，利用机器学习算法整合临床、影像及潜在的生物标志物（如治疗前后甲状腺球蛋白水平及其动态变化、特定基因表达谱等），有望构建预测儿童放射性碘治疗反应的模型，但目前此类研究尚在起步阶段[24-25]。

儿童甲状腺对电离辐射更为敏感，放射性碘治疗可能引发唾液腺损伤、性腺功能抑制及第二原发恶性肿瘤等并发症[15]，因此剂量个体化优化非常重要。但目前的剂量方案多通过参考成人经验计量同时基于儿童体重或体表面积进行调整，并结合病情及病变范围采用全身剂量法或病灶定向法计算[26-27]。AI在实现儿童放射性碘治疗剂量精准化方面具有巨大潜力。有望通过整合儿童特异性参数（如体重、生长发育阶段、肿瘤生物学特性及辐射剂量-效应关系），构建个性化给药模型，从而在确保治疗效果的同时将辐射暴露对发育中器官的潜在损伤最小化[22]。

3.3　AI构建预后预测模型　儿童及青少年甲状腺癌的预后需综合多因素评估。2015年ATA首次发布了针对受甲状腺癌影响的成人患者的指南[28]，指南将患者分为低、中、高复发风险3类。然而这种源自成人指南的风险分类方法并未在甲状腺癌患儿中得到验证。近年来，开展了很多针对儿童建立的风险预测模型，尽管研究结果存在争议，但大多数研究数据表明，早期治疗反应不佳和术前刺激甲状腺球蛋白（sTg）水平高是患儿预测不良的核心指标[29]。

AI的应用可提高预测甲状腺癌患儿预后的精度。Wang等[30]研究团队首次利用机器学习模型为儿童乳头状甲状腺癌患者提供了个体化预后分层工具，该模型基于蛋白质组学，利用机器学习筛选出19个关键蛋白（包括LGALS3、CHGA[31]等已报道的甲状腺癌相关蛋白），构建了复发风险预测模型。模型在独立测试集中准确率达88.24%，可有效将患儿分为高/低复发风险组。其中，LGALS3作为枢纽蛋白，在高风险组表达显著升高。该蛋白质模型优于临床特征（如年龄、淋巴结转移数量），可辅助临床手术决策和随访策略制定，避免低风险患儿过度治疗或高风险患儿监测不足。然而当前AI模型仍存在单中心回顾性设计及儿童群体长期验证缺失等问题，且对非乳头状癌亚型及基因组标志物覆盖不足。未来需通过前瞻性多中心研究以及更大队列和更长随访时间的研究，同时整合多维数据（如超声图像、基因信息、血液检测等），以获得更准确的评估，从而优化儿童特异性预后模型，为个体化治疗决策提供精准依据。

4　结语与展望

AI技术在儿童及青少年甲状腺癌的个体化诊疗方面展现了明显的优势。但基于成人数据训练的算法难以适应儿童影像的异质性。当前发展的主要瓶颈包括：儿童专属数据缺失制约了影像与生物学关联的解析；跨年龄模型因迁移学习策略不足导致泛化能力弱；多中心协作机制尚不成熟阻碍了标准化诊疗方案的验证与推广。未来研究应聚焦以下关键方向：（1）整合超声动态影像、基因组数据和长期随访结果，建立特异性多模态数据库，揭示儿童及青少年甲状腺癌特有的影像与生物学关联；

（2）开发轻量级自适应模型，通过迁移学习保留成人数据通用特征，并利用对抗训练提升对儿童异质性病变的识别能力；（3）探索AI与ACR TI-RADS的协同优化，如将AI高风险标识与TI-RADS形态学评分结合，在保持高敏感性的同时提高特异性；（4）建立多中心协作网络，采用严格统一的儿童特异性数据集标准，纳入关键特征变量（如年龄、TNM分期、初始手术范围、放射性碘治疗反应、治疗相关并发症以及分子特征等），确保数据的可比性与深度。

总之，多学科技术融合与循证数据积累将不断完善AI模型，推动儿童及青少年甲状腺癌的诊疗模式从经验分层向精准决策跨越，最终实现风险可控与生存优化的双重目标。

参 考 文 献

[1] Vaccarella S, Lortet-Tieulent J, Colombet M, et al. Global patterns and trends in incidence and mortality of thyroid cancer in children and adolescents: a population-based study[J]. Lancet Diab Endocrinol, 2021, 9(3): 144-152. DOI:10.1016/S2213-8587(20)30401-0.

[2] Li G, Tai JW, Moon PK, et al. Update on Pediatric Thyroid Cancer Incidence and Mortality Trends in the United States, 2000-2018[J]. Cancer Invest, 2024, 42(4): 357-360. DOI: 10.1080/07357907.2024.2353313.

[3] Lamartina L, Leboulleux S, Schlumberger M. Thyroid cancer incidence in children and adolescents[J]. Lancet Diabetes Endocrinol, 2021, 9(3): 128-129. DOI:10.1016/S2213-8587(20)30430-7.

[4] Ohtsuru A, Midorikawa S, Ohira T, et al. Incidence of Thyroid Cancer Among Children and Young Adults in Fukushima, Japan, Screened With 2 Rounds of Ultrasonography Within 5 Years of the 2011 Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Accident[J]. JAMA Otolaryngol Head Neck Surg, 2019, 145(1): 4-11. DOI: 10.1001/jamaoto.2018.3121.

[5] Bernier MO, Withrow DR, Berrington de Gonzalez A, et al. Trends in pediatric thyroid cancer incidence in the United States, 1998-2013 [J]. Cancer, 2019, 125(14): 2497-2505. DOI:10.1002/cncr.32125.

[6] Baumgarten H, Jenks CM, Isaza A, et al. Bilateral papillary thyroid cancer in children: Risk factors and frequency of postoperative diagnosis[J]. J Pediatr Surg, 2020, 55(6): 1117-1122. DOI:10.1016/j.jpedsurg.2020.02.040.

[7] Srivatsa S, Al-Hadidi A, Stanek J, et al. Assessing the Diagnostic Accuracy of TI-RADS in Pediatric Thyroid Nodules: A Multi-institutional Review[J]. JPediatr Surg, 2025, 60(1): 161924. DOI: 10.1016/j.jpedsurg.2024.161924.

[8] Guo K, Qian K, Shi Y, et al. Clinical and Molecular Characterizations of Papillary Thyroid Cancer in Children and Young Adults: A Multicenter Retrospective Study[J]. Thyroid, 2021, 31(11): 1693-1706. DOI:10.1089/thy.2021.0003.

[9] Peng S , Liu Y , Lv W ,et al.Deep learning-based artificial intelligence model to assist thyroid nodule diagnosis and management: a multicentre diagnostic study[J]. The Lancet Digital Health, 2021, 3 (4): e250-e259. DOI:10.1016/S2589-7500(21)00041-8.

[10] Lee J, Yoon JH, Lee E, et al. Immune response and mesenchymal transition of papillary thyroid carcinoma reflected in ultrasonography features assessed by radiologists and deep learning[J]. J Adv Res, 2024, 62: 219-228. DOI:10.1016/j.jare.2023.09.043.

[11] Wang J, Zheng N, Wan H, et al. Deep learning models for thyroid nodules diagnosis of fine-needle aspiration biopsy: a retrospective, prospective, multicentre study in China[J]. Lancet Digit Health, 2024, 6(7): e458-e469. DOI:10.1016/S2589-7500(24)00085-2.

[12] Chiosea S, Hodak SP, Yip L, et al. Molecular Profiling of 50 734 Bethesda III-Ⅵ Thyroid Nodules by ThyroSeq v3: Implications for Personalized Management[J]. J Clin Endocrinol Metab, 2023, 108 (11): 2999-3008. DOI:10.1210/clinem/dgad220.

[13] Patel KN, Angell TE, Babiarz J, et al. Performance of a Genomic Sequencing Classifier for the Preoperative Diagnosis of Cytologically Indeterminate Thyroid Nodules[J]. JAMA Surg, 2018, 153(9): 817-824. DOI:10.1001/jamasurg.2018.1153.

[14] Yang J, Page LC, Wagner L, et al. Thyroid Nodules on Ultrasound in Children and Young Adults: Comparison of Diagnostic Performance of Radiologists′ Impressions, ACR TI-RADS, and a Deep Learning Algorithm[J]. AJR Am J Roentgenol, 2023, 220(3): 408-417. DOI: 10.2214/AJR.22.28231.

[15] Francis GL, Waguespack SG, Bauer AJ, et al. Management guidelines for children with thyroid nodules and differentiated thyroid cancer[J]. Thyroid, 2015, 25(7): 716-759. DOI: 10.1089/thy.2014.0460.

[16] 国家儿童医学中心，国家儿童肿瘤监测中心，中华医学会小儿外科学分会，等.中国儿童甲状腺结节及分化型甲状腺癌专家共识[J].中华实用儿科临床杂志，2020，35（20）：1521-1530.

[17] Nice T, Pasara S, Goldfarb M, et al. Pediatric papillary thyroid cancer >1 cm: is total thyroidectomy necessary[J]. J Pediatr Surg, 2015, 50(6): 1009-1013. DOI:10.1016/j.jpedsurg.2015.03.031.

[18] Maksimoski M, Bauer AJ, Kazahaya K, et al. Outcomes in Pediatric Thyroidectomy: Results From a Multinational, Multi-institutional Database[J]. Otolaryngol Head Neck Surg, 2022, 167(5): 869-876. DOI:10.1177/01945998221076065.

[19] Sugino K, Nagahama M, Kitagawa W, et al. Risk stratification of pediatric patients with differentiated thyroid cancer:is total thyroidectomy necessary for patients at any risk[J]. Thyroid, 2020, 30(4): 548-556. DOI:10.1089/thy.2019.0231.

[20] Li J, Xia F, Wang X, et al. Multiclassifier Radiomics Analysis of Ultrasound for Prediction of Extrathyroidal Extension in Papillary Thyroid Carcinoma in Children[J]. Int J Med Sci, 2023, 20(2): 278-286. DOI:10.7150/ijms.79758.

[21] Gong J, Holsinger FC, Noel JE, et al. Using deep learning to identify the recurrentlaryngeal nerve during thyroidectomy[J]. Sci Rep, 2021, 11(1): 14306. DOI:10.1038/s41598-021-93202-y.

[22] Toro-Tobon D, Loor-Torres R, Duran M, et al. Artificial Intelligence in Thyroidology: A Narrative Review of the Current Applications, Associated Challenges, and Future Directions[J]. Thyroid, 2023, 33(8): 903-917. DOI:10.1089/thy.2023.0132.

[23] Bojarsky M, Baran JA, Halada S, et al. Outcomes of ATA Low-Risk

Pediatric Thyroid Cancer Patients Not Treated With Radioactive Iodine Therapy[J]. J Clin Endocrinol Metab, 2023, 108(12): 3338-3344. DOI:10.1210/clinem/dgad322.

[24] Zheng T, Zheng Y, Zhou Z, et al. C-reactive protein-to-albumin ratio predicts outcome of neoadjuvant chemotherapy for colorectal liver metastases: A multicenter prediction model[J]. Surgery, 2025, 182: 109334. DOI:10.1016/j.surg.2025.109334.

[25] Nie F, Pei X, Du J, et al. Multiomics-Based Deep Learning Prediction of Prognosis and Therapeutic Response in Patients With Extensive-Stage Small Cell Lung Cancer Receiving Chemoimmunotherapy: A Retrospective Cohort Study[J]. Int J Gen Med, 2025, 18: 981-996. DOI:10.2147/IJGM.S506485.

[26] Lassmann M, Hanscheid H, Verburg FA, et al. The use of dosimetry in the treatment of differentiated thyroid carcinoma[J]. Q J Nucl Med Mol Imaging, 2011, 55: 107-115.

[27] Kumar P, Damle NA, Bal C. Radioiodine Therapy in Pediatric Differentiated Thyroid Cancer: Dosimetry, Clinical Care, and Future Challenges[J]. Clin Nucl Med, 2023, 48(2): 158-167. DOI:10.1097/RLU.0000000000004431.

[28] Haugen BR, Alexander EK, Bible KC, et al. 2015 American Thyroid Association Management Guidelines for Adult Patients with Thyroid Nodules and Differentiated Thyroid Cancer: The American Thyroid Association Guidelines Task Force on Thyroid Nodules and Differentiated Thyroid Cancer[J]. Thyroid, 2016, 26(1): 1-133. DOI: 10.1089/thy.2015.0020.

[29] 叶挺，郑阿莲，靳水，等.^{131}I治疗前ps-Tg水平对儿童及青少年分化型甲状腺癌疗效与预后的影响[J].浙江临床医学，2024，26(7)：1022-1023，1026.

[30] Wang Z, Wang H, Zhou Y, et al. An individualized protein-based prognostic model to stratify pediatric patients with papillary thyroid carcinoma[J]. Nat Commun, 2024, 15(1): 3560. DOI: 10.1038/s41467-024-47926-w.

[31] Bartolazzi A, Sciacchitano S, D′Alessandria C. Galectin-3: The Impact on the Clinical Management of Patients with Thyroid Nodules and Future Perspectives[J]. Int J Mol Sci. 2018, 19(2): 445. DOI: 10.3390/ijms19020445.

（收稿日期：2025-06-05）

读者·作者·编者

欢迎订阅2026年《中国现代普通外科进展》杂志

《中国现代普通外科进展》杂志是国家教育部主管、山东大学主办的学术性刊物，国内外公开发行，以从事普通外科的临床工作者、科研人员和研究生为主要读者对象，报道普通外科领域内的最新学术动态与进展、临床实践经验和原创性科研成果，以及与临床密切结合的基础理论研究。

本刊贯彻我刊顾问、中国科学院院士裘法祖教授提出的“在现代中获得启迪，读进展后有所创新”的办刊方向，坚持以“现代”“进展”为导向，启迪读者，以提高广大普通外科工作者的业务水平与科研能力。

本刊为月刊，每年12期。定价：15元/期，180元/年。

订阅方法：(1)通过全国邮局订阅(邮发代号：24-190)

(2)向编辑部订阅

地址：山东省济南市文化西路107号(250012)

电话：0531-82169203

联系人：连培凤