

儿童CT辐射暴露及防护进展

吴镭杰¹, 刘 潜^{2*}

¹赣南医科大学第一临床医学院, 江西 赣州

²江西中医药大学中西医结合儿童健康研究院, 江西 南昌

收稿日期: 2024年12月22日; 录用日期: 2025年1月15日; 发布日期: 2025年1月27日

摘 要

目的: 了解儿童CT辐射暴露的影响以及CT防护的进展。方法: 通过阅读文献, 总结目前研究发现的儿童CT暴露的影响, 以及减少CT辐射的探索。结论: 儿童CT辐射暴露后受到影响较成年人更大, 患癌风险增加, 必须引起重视, 常用的方法包括选择可替代的检查来减少CT次数, 或在使用CT时, 使用防护装置, 添加预过滤器, 调整CT暴露参数, 建立儿童诊断参考水平, 应用新型后处理技术、AI技术, 研究使用新型设备, 这些方法都能有效减少CT辐射暴露, 从而降低对儿童的长期影响。

关键词

儿童, CT, 辐射暴露, 辐射防护

Advances in Radiation Exposure and Protection of CT in Children

Rongjie Wu¹, Qian Liu^{2*}

¹The First Clinical College of Medicine, Gannan Medical University, Ganzhou Jiangxi

²Institute of Integrative Chinese and Western Medicine Children's Health, Jiangxi University of Chinese Medicine, Nanchang Jiangxi

Received: Dec. 22nd, 2024; accepted: Jan. 15th, 2025; published: Jan. 27th, 2025

Abstract

Objective: To investigate the effects of CT radiation exposure in children and the progress of CT protection. **Methods:** By reading the literature, we summarized the effects of current studies on children's CT exposure and explored ways to reduce CT radiation. **Conclusion:** Children are more affected by CT radiation exposure than adults and have an increased risk of cancer, which must be

*通讯作者。

文章引用: 吴镭杰, 刘潜. 儿童 CT 辐射暴露及防护进展[J]. 临床医学进展, 2025, 15(1): 1581-1587.

DOI: 10.12677/acm.2025.151212

paid attention to. Common methods include choosing alternative examinations to reduce the number of CT scans, or using protective devices when using CT, adding pre-filters, adjusting CT exposure parameters, establishing diagnostic reference levels for children, applying new post-processing technologies and AI technologies. Using new equipment, these methods are effective in reducing CT radiation exposure, thereby reducing the long-term effects on children.

Keywords

Children, CT, Radiation Exposure, Radiation Protection

Copyright © 2025 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. 引言

电离辐射会导致癌症风险增加, 绝大部分电离辐射来源于医疗辐射, 近年来随着医学诊疗技术的发展与应用, 越来越多的人受到医疗电离辐射暴露, 其中 CT 提供的医疗电离辐射暴露占总量约 60%, 由于儿童相比成人更易受到辐射暴露的影响, 所以认识到儿童 CT 辐射暴露的风险, 如何合理应用 CT, 减少 CT 的辐射暴露有重要意义, 本文就儿童 CT 辐射暴露与防护进展进行综述。

2. 儿童 CT 辐射暴露的认识

人体受到的辐射来源有天然本底辐射、医疗辐射以及其他辐射。医疗辐射暴露在这些来源中是人体受到最大的辐射暴露源。联合国原子辐射效应科学委员会(UNSCEAR)在 2020/2021 报告里提到, 在 2009 年至 2018 年期间, 每年完成约 42 亿次医学放射学检查。CT 的检查次数占有放射检查的 10%, 但年集体有效剂量最大, 占到了总剂量的 62% [1]。同时 CT 在儿童疾病的诊疗使用也在增加。在美国, 在 0~5 岁的儿童中, CT 使用量由 1996 年的 11/1000 增加一倍, 在 2005~2007 年达到 20/1000, 在 5~14 岁的儿童中, CT 的使用量也增加了两倍[2]。荷兰的一项研究发现, 1990~2012 年间, 估计荷兰儿童接受 CT 扫描的数量已经增加 3 倍以上[3]。CT 在儿童疾病诊疗的使用增加也增加儿童个体受到的电离辐射暴露。

计算机断层扫描(Computed Tomography, CT)起源于 1975 年, 由英国工程师 Godfrey Hounsfield 和南非物理学家 Allan Cormack 共同推动发明, 自第一台 CT 扫描仪在伦敦的医院使用后, CT 便展现出了它的魅力, 在全世界范围的得到使用[4]。此后, 随着计算机技术, X 射线探测器的进步, CT 得到了快速发展, 现在已成为临床诊疗中不可缺少的一部分。使用 CT 带来的便捷与它成像的清晰, 给临床诊疗带来了方便, 但同时产生了大量的电离辐射, 这些积累都会对人体产生影响。

3. CT 辐射对儿童影响

辐射暴露的影响有两类: 包括确定性效应与随机性效应。随机效应进一步分为体细胞效应和遗传效应, 它们的特征是没有阈值剂量。随着辐射暴露的增加, 患癌症的可能性也相应增加。另一方面, 如果辐射剂量超过确定性效应的阈值, 则可能会发生并发症。皮肤红斑、不育和白内障是可能发生的许多潜在不良后果的几个例子。儿童与成人相比, 对电离辐射的敏感性更高, 更容易发生辐射诱发的恶性肿瘤, 同时儿童的预期寿命更长, 有机会表达辐射损伤的可能性更大。目前国际上一些大型队列研究估计了儿童在接受 CT 暴露后的患癌风险[5]-[7]。澳大利亚 John D Mathews 等人的研究提出, 儿童暴露人群的总体癌症发病率比未暴露人群高 24%, 每增加 1 次 CT 扫描, 发病率比会增加 0.16, 年龄越小, 发病率比越

高[5]。Marks Pearce 等人的研究提出在儿童中使用 CT 扫描提供约 50 mGy 的累积剂量会增加 3 倍白血病发生概率, 而约 60 mGy 的剂量会增加 3 倍脑癌的发生概率, 10 岁以下患者首次 CT 扫描后的 10 年内, 每 10,000 次头部 CT 扫描中会出现 1 例白血病患者[6]。I-Gung Li 的研究认为接受 CT 扫描的儿童队列中在未来颅内恶性肿瘤的发病风险更高[7]。这些研究都提示了 CT 的辐射暴露会对儿童的长期健康带来影响。

4. CT 防护进展

CT 的使用在临床上为民众疾病的诊断治疗以及健康管理监护提供了很大帮助, 但是 CT 辐射暴露的影响不可忽视, 尤其是对于儿童。国际上遵循 ALARA 原则(As Low as Reasonably Achievable), 来减少辐射暴露带来的风险, 意思是要在确保安全与使用的前提下, 尽可能地降低辐射剂量。目前的探索也是在保证图像质量的前提下, 尽可能地减少辐射暴露剂量。本文通过阅读文献提取的信息并分析, 总结了目前减少儿童患者 CT 辐射暴露的各种技术和策略。

4.1. 减少 CT 检查使用, 选择可替代的检查

临床中常用的检查方法包括: X 片, CT, MRI, 超声等, CT 以快捷, 诊断价值高在临床中被大量使用。在临床应用中, 患者因为不同的情况就诊, 那么接诊医师可以根据患者的疾病情况, 在保证诊断效果与安全的情况下, 选择非 CT 检查来达到同样的诊断目的。一些研究也表明在特定情况下, 非 CT 检查同样有效。Dan Liu 等人的回顾性研究提出超声可以替代 CT 用于输尿管结石的初始影像学检查[8]。Francesca De Luca 的前瞻性研究提出, 在择期儿科患者中, 使用 1 分钟多对比序列的全脑 MRI 在不使用麻醉的情况下耐受好, 同时诊断性能与 CT 相当[9]。Alessia Cicogna 提出在儿童急诊颅脑外伤中, 颅骨床旁超声(POCUS)、近红外光谱(NIRS)技术可以识别颅骨骨折的存在, 筛查颅内血肿。目前的研究提示快速磁共振成像(MRI)正在成为 CT 的准确有效的替代方式[10]。在临床使用中, 根据患者疾病、病情不同, 我们可以尽量选择替代 CT 的检查方法, 在不同情况下选择性使用超声或 MRI, 同样能达到准确有效的诊断水平, 并且有效减少 CT 带来的辐射暴露。

4.2. 调整 CT 暴露参数

影响 CT 检查辐射量的主要因素是管电压(kVp)、管电流(mAs)等, 管电压是施加在 X 线管两极之间的电压, 管电压越大, X 射线的能量与穿透能力越强。管电流是指通过 X 射线管的电子流量, 也是影响 X 射线产生的重要参数。管电流影响 X 射线的强度和产生速率。X 射线管的管电压和管电流是影响 X 射线产生的两个重要参数, 它们通过控制 X 射线的能量、强度和产生速率, 直接影响着 X 射线的应用效果和设备的安全性。合理选择管电压和管电流, 是保证 X 射线成像质量和设备稳定运行的关键。所以在不影响图像质量的情况下, 减小管电压、管电流就可以降低单次 CT 的辐射暴露量。Kim 的研究提到管电压的平方与辐射剂量成正比, 使用低管电压能有效降低辐射剂量[11]。Yoshida K 的前瞻性研究提出与管电压 80 kVp 和 DLR 技术的联合使用与使用管电压 120 kVp 相比, 能得到更好的图像, 同时减少了辐射和造影剂使用剂量[12]。降低管电压是有效方法, 如何更好地调控数据也是探索的方向。随着科技的进步, 目前发展出了智能调控管电压、管电流的方法: 自动管电流调制(ATCM)和自动管电压选择(ATVS)。Papadakis 和 Damilakis 的研究表明, 使用 ATCM 和 ATVS 可以大幅减少辐射剂量, 尽管减少的量因年龄组和临床模式而异[13]。在降低儿童 CT 辐射剂量的方法中, 调整 CT 辐射暴露参数是有效的, 在使用中降低管电压、管电流, 并且采用智能调控的方法, 都能够显著降低儿童在 CT 检查中的暴露剂量。

4.3. 使用防护装置, 增加过滤器

预过滤器是位于 X 射线源和受照者之间, 在 X 射线到达目标前调整 X 射线的光谱分布, 从而优化

图像质量和减少辐射剂量。Leyendecker 等使用预过滤器成功地将腹部 CT 的剂量显著降低了 81% [14]。根据 Weis 的研究, 使用预过滤器后, 儿童胸部 CT 中观察到剂量显著减少 77% [15]。Mozaffary 等人进行的一项研究发现, 使用预过滤器与降低管电压, 在尿路结石病的 CT 扫描中, 剂量减少由 28% 增至 66%。使用预过滤器是减少 CT 检查中辐射剂量的有效方法 [16]。使用预过滤器时也能结合其他降低辐射暴露的方法, 比如降低管电压, Steidel 等人使用具有不同厚度和管电压的锡和铜预滤器进行了研究。他们证明了, 在特定配置下, 辐射剂量最高减少 67% [17], 增加预过滤器是儿童 CT 剂量优化的有效的方法。不仅如此, 使用预过滤器可以比未预过滤能生成更高质量的图像。Greffier 等的研究发现, 在西门子 SOMATOM Force 系统上使用锡滤光片可以提高溶骨和硬化性骨病变、肺部毛玻璃混浊以及高对比度肺部病变的识别图像质量 [18]。增加预过滤的主要好处是降低辐射剂量, 但是, 在某些应用中, 增加预过滤器同样能使图像质量得到提高。随着 CT 技术的进步, 预过滤器设计也在不断改进, 从而适应更高的图像要求与更低的辐射剂量。

4.4. 建立儿童的诊断参考水平(DRL)

诊断参考水平是一个用于儿童放射防护最优化的重要工具, 它并不是一个安全限值或标准, 而是在特定医学影像检查条件下, 给予患者的平均辐射剂量的调查数据所确定的水平。DRL 包括本地诊断参考水平(LDRL)、国家诊断参考水平(NDRL)和区域诊断参考水平(RDRL)。1996 年, 国际放射防护委员会(ICRP)提出了 DRL, 2012 年我国发布的 GBZ 165-2012 《X 射线计算机断层摄影放射防护要求》也提到了“诊断参考水平” [19]。DRL 的建立是一种减少辐射暴露的有效的方法。Satharasinghe 等提出以可达到剂量(AD)和 DRL 为基线, 报告了辐射暴露减少高达 90% [20]。Muhammad 等强调需要应用 DRL, 利用它来最大限度地减少儿科患者 CT 扫描中的辐射暴露 [21]。国内最新的《儿童 CT 检查辐射剂量标准中国专家共识》也对中国儿童进行平扫或增强的 CT 辐射剂量标准做出推荐 [22]。DRL 对于放射操作的辐射安全非常重要。它们可以在当地机构、成像机构、某些地区甚至整个国家使用。使用 DRL 能够从辐射剂量的调节来减少不必要的辐射暴露, 降低儿童 CT 辐射暴露的风险。此外, DRL 用作辐射剂量的参考值。这使医疗保健机构能够将自己的风险量与既定标准甚至其他地区或国家的数据进行比较。这些都有助于儿童 DRL 的建立、完善, 有利于减少儿童 CT 辐射暴露 [23]。

4.5. 应用新型后处理技术

使用新型后处理技术的优点包括: 减少辐射剂量, 提示图像质量, 增加安全性, 提升工作效率等。常用的方法比如迭代重建技术, 能够降低辐射剂量并提高儿童 CT 的图像质量。Singh 等将迭代重建与颜色编码的儿科方案相结合, 使用自动管电流调制、临床适应症和基于体重的扫描参数微调。Atul Padole 等指出迭代重建技术使胸部、腹部和头颈部 CT 以及儿科 CT 的图像质量得到改善, 图像噪声降低。同时迭代重建技术有可能通过降低管电流或管电位来实现 CT 辐射剂量优化。近年来科技发展迅速, AI 在后处理技术中的使用能显著减少患者在 CT 扫描期间暴露的辐射剂量。Zhang 等发表的研究展示了卷积神经网络 CNN 能够将辐射暴露减少 36%~70%, 并且保证了图像质量 [24]。Kim [11] 等和 Brady [25] 等都发现, 使用 DLIR 后, 辐射暴露显著减少。Nagayama [26] 等发现, 根据他们的研究, 与混合迭代重建(HIR)相比, DLIR 导致辐射剂量降低了 50%。这几项研究都为应用后处理技术降低 CT 辐射暴露提供了证据。在安全性方面, 减少儿童 CT 成像中的辐射剂量至关重要, 因为降低辐射剂量可以降低与辐射暴露相关的长期健康问题的发生。AI 的使用在提高接受 CT 成像以调查健康状况的儿科患者的安全性方面发挥着重要作用。与传统方法相比, 在医学成像领域使用 AI 也可以快速处理和重建图像, 从而提高工作效率。Zhang 与 Seeram E 的综述详细介绍了包括 DLIR 的应用、曝光参数的优化、预过滤和 AI 后处理。应用这些方

法就可以在不影响 CT 图像质量情况下使辐射剂量降低。这样就可以最大限度地减少儿童的辐射暴露, 同时保持诊断的准确性[27]。

4.6. 研究使用新型设备

光子计数探测器(PCD) CT 是目前 CT 技术的最新进展, 它的优点包括: 能够降低辐射剂量、拥有更高的空间分辨率、固有的光谱成像能力以及减少图像的金属伪影。光子计数探测器 CT 不同于传统 CT 中使用的能量积分探测器, 它的特殊性在于能够检测单个 X 射线光子并记录其能量, 这样使光子计数探测器 CT 在数据采集阶段就能实现 X 射线光谱信息的利用。Alexander 等的回顾性研究指出, 与传统的能量积分探测器 CT 相比, 光子计数探测器 CT 在儿童胸部造影中得到了更低的辐射暴露参数[28]。Jeong Sub Lee 等的研究提出: 与传统的能量积分探测器 CT 相比, PCD 颞骨 CT 在较低辐射剂量下得到了更加优秀的图像质量[29]。Ismail Mese 等认为, 光子计数探测器 CT 已成为另一项开创性技术, 可实现高分辨率图像, 同时大幅减少辐射剂量[30]。光子计数探测器 CT 的优点明显, 但是发展也面临挑战, 需要开放更高效、成本更低的光子计数探测器, 在数据处理方面需要更强的处理能力与速度, 并且为了安全性, 需要建立相应的标准。总之, 光子计数探测器 CT 作为新型设备, 是 CT 技术发展的一个重要方向, 并且它能够在提升影像图像的基础上, 降低辐射暴露。在儿科学应用之外, 光子计数探测器 CT 在心血管疾病的应用也带来优势。在心血管影像学检查中, 光子计数探测器 CT 能提高心血管结构的分辨率, 改善心血管结构的信噪比, 在心血管后处理应用上更有优势。例如, 一项对 100 名有随访 PCD CT 行主动脉造影患者的研究显示, 与传统的能量积分探测器 CT 相比, 造影剂使用减少了 25%, 同时保持相同的图像质量[31]。同时光子计数探测器 CT 对肿瘤疾病等的使用探索也在进行, 光子计数探测器 CT 使用的前景广阔。

5. 总结

CT 的使用给临床诊疗带来了便利, 但是儿童使用 CT 带来的远期影响不可忽视, 为了减少 CT 带来的辐射暴露, 我们可以通过减少 CT 的使用, 选择替代的检查方法, 在使用中增加预过滤器, 建立适合的 DRL, 调整参数来降低辐射暴露, 同时在 AI 与科技进步的当下, 新型后处理技术与新设备的创造与应用也为降低 CT 辐射暴露提供帮助。

参考文献

- [1] Chen, J. (2024) A Summary of UNSCEAR Evaluation on Medical Exposure to Ionizing Radiation and Call for More Representative Data. *Radiation Medicine and Protection*, 5, 7-10. <https://doi.org/10.1016/j.radmp.2023.12.001>
- [2] Miglioretti, D.L., Johnson, E., Williams, A., Greenlee, R.T., Weinmann, S., Solberg, L.I., *et al.* (2013) The Use of Computed Tomography in Pediatrics and the Associated Radiation Exposure and Estimated Cancer Risk. *JAMA Pediatrics*, 167, 700-707. <https://doi.org/10.1001/jamapediatrics.2013.311>
- [3] Meulepas, J.M., Smets, A.M.J.B., Nievelstein, R.A.J., Gradowska, P., Verbeke, J., Holscher, H.C., *et al.* (2016) Trends and Patterns of Computed Tomography Scan Use among Children in the Netherlands: 1990-2012. *European Radiology*, 27, 2426-2433. <https://doi.org/10.1007/s00330-016-4566-1>
- [4] Vaughan, C.L. and Mayosi, B.M. (2007) Origins of Computed Tomography. *The Lancet*, 369, 1168. [https://doi.org/10.1016/s0140-6736\(07\)60562-5](https://doi.org/10.1016/s0140-6736(07)60562-5)
- [5] Mathews, J.D., Forsythe, A.V., Brady, Z., Butler, M.W., Goergen, S.K., Byrnes, G.B., *et al.* (2013) Cancer Risk in 680,000 People Exposed to Computed Tomography Scans in Childhood or Adolescence: Data Linkage Study of 11 Million Australians. *BMJ*, 346, f2360-f2360. <https://doi.org/10.1136/bmj.f2360>
- [6] Pearce, M.S., Salotti, J.A., Little, M.P., McHugh, K., Lee, C., Kim, K.P., *et al.* (2012) Radiation Exposure from CT Scans in Childhood and Subsequent Risk of Leukaemia and Brain Tumours: A Retrospective Cohort Study. *The Lancet*, 380, 499-505. [https://doi.org/10.1016/s0140-6736\(12\)60815-0](https://doi.org/10.1016/s0140-6736(12)60815-0)
- [7] Li, I., Yang, Y., Li, Y. and Tsai, Y. (2020) Paediatric Computed Tomography and Subsequent Risk of Leukaemia,

- Intracranial Malignancy and Lymphoma: A Nationwide Population-Based Cohort Study. *Scientific Reports*, **10**, Article No. 7759. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-64805-8>
- [8] Liu, D., Wu, J., Chen, S., Liu, Y., Zhang, G., Ping, H., *et al.* (2019) Ultrasonography Can Replace CT Scans as the Initial Imaging Examination of Ureteral Calculi. *Urologia Internationalis*, **103**, 68-73. <https://doi.org/10.1159/000500099>
 - [9] De Luca, F., Kits, A., Martin Muñoz, D., Aspelin, Å., Kvist, O., Österman, Y., *et al.* (2024) Elective One-Minute Full Brain Multi-Contrast MRI versus Brain CT in Pediatric Patients: A Prospective Feasibility Study. *BMC Medical Imaging*, **24**, Article No. 23. <https://doi.org/10.1186/s12880-024-01196-6>
 - [10] Cicogna, A., Minca, G., Posocco, F., Corno, F., Basile, C., Da Dalt, L., *et al.* (2022) Non-Ionizing Imaging for the Emergency Department Assessment of Pediatric Minor Head Trauma. *Frontiers in Pediatrics*, **10**, Article 881461. <https://doi.org/10.3389/fped.2022.881461>
 - [11] Kim, D., Jeon, P., Lee, C. and Chung, M. (2023) Effect of Tube Voltage and Radiation Dose on Image Quality in Pediatric Abdominal CT Using Deep Learning Reconstruction: A Phantom Study. *Symmetry*, **15**, Article 501. <https://doi.org/10.3390/sym15020501>
 - [12] Yoshida, K., Nagayama, Y., Funama, Y., Ishiuchi, S., Motohara, T., Masuda, T., *et al.* (2024) Low Tube Voltage and Deep-Learning Reconstruction for Reducing Radiation and Contrast Medium Doses in Thin-Slice Abdominal CT: A Prospective Clinical Trial. *European Radiology*, **34**, 7386-7396. <https://doi.org/10.1007/s00330-024-10793-6>
 - [13] Papadakis, A.E. and Damilakis, J. (2019) Automatic Tube Current Modulation and Tube Voltage Selection in Pediatric Computed Tomography: A Phantom Study on Radiation Dose and Image Quality. *Investigative Radiology*, **54**, 265-272. <https://doi.org/10.1097/rli.0000000000000537>
 - [14] Leyendecker, P., Faucher, V., Labani, A., Noblet, V., Lefebvre, F., Magotteaux, P., *et al.* (2018) Prospective Evaluation of Ultra-Low-Dose Contrast-Enhanced 100-Kv Abdominal Computed Tomography with Tin Filter: Effect on Radiation Dose Reduction and Image Quality with a Third-Generation Dual-Source CT System. *European Radiology*, **29**, 2107-2116. <https://doi.org/10.1007/s00330-018-5750-2>
 - [15] Weis, M., Henzler, T., Nance, J.W., Haubenreisser, H., Meyer, M., Sudarski, S., *et al.* (2017) Radiation Dose Comparison between 70 kVp and 100 kVp with Spectral Beam Shaping for Non-Contrast-Enhanced Pediatric Chest Computed Tomography: A Prospective Randomized Controlled Study. *Investigative Radiology*, **52**, 155-162. <https://doi.org/10.1097/rli.0000000000000325>
 - [16] Mozaffary, A., Trabzonlu, T.A., Kim, D. and Yaghmai, V. (2019) Comparison of Tin Filter-Based Spectral Shaping CT and Low-Dose Protocol for Detection of Urinary Calculi. *American Journal of Roentgenology*, **212**, 808-814. <https://doi.org/10.2214/ajr.18.20154>
 - [17] Steidel, J., Maier, J., Sawall, S. and Kachelrieß, M. (2021) Dose Reduction Potential in Diagnostic Single Energy CT through Patient-Specific Prefilters and a Wider Range of Tube Voltages. *Medical Physics*, **49**, 93-106. <https://doi.org/10.1002/mp.15355>
 - [18] Greffier, J., Pereira, F., Hamard, A., Addala, T., Beregi, J.P. and Frandon, J. (2020) Effect of Tin Filter-Based Spectral Shaping CT on Image Quality and Radiation Dose for Routine Use on Ultralow-Dose CT Protocols: A Phantom Study. *Diagnostic and Interventional Imaging*, **101**, 373-381. <https://doi.org/10.1016/j.diii.2020.01.002>
 - [19] 高通, 王小山, 马娅, 等. 儿童 CT 检查诊断参考水平研究进展[J]. 中国辐射卫生, 2024, 33(2): 215-220.
 - [20] Satharasinghe, D., Jeyasugiththan, J., Wanninayake, W.M.N.M.B., Pallewatte, A.S. and Samarasinghe, R.A.N.K.K. (2022) Patient Size as a Parameter for Determining Diagnostic Reference Levels for Paediatric Computed Tomography (CT) Procedures. *Physica Medica*, **102**, 55-65. <https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2022.09.004>
 - [21] Muhammad, N.A., Abdul Karim, M.K., Abu Hassan, H., Ahmad Kamarudin, M., Ding Wong, J.H. and Ng, K.H. (2020) Diagnostic Reference Level of Radiation Dose and Image Quality among Paediatric CT Examinations in a Tertiary Hospital in Malaysia. *Diagnostics*, **10**, Article 591. <https://doi.org/10.3390/diagnostics10080591>
 - [22] 中华医学会儿科学分会影像学组, 中华医学会儿科学分会放射学组, 彭芸, 等. 儿童 CT 检查辐射剂量标准中国专家共识[J]. 中华放射学杂志, 2024, 58(2): 158-164.
 - [23] Sun, J., Yang, L., Zhou, Z., Zhang, D., Han, W., Zhang, Q., *et al.* (2020) Performance Evaluation of Two Iterative Reconstruction Algorithms, MBIR and ASIR, in Low Radiation Dose and Low Contrast Dose Abdominal CT in Children. *La Radiologia Medica*, **125**, 918-925. <https://doi.org/10.1007/s11547-020-01191-1>
 - [24] Zhang, K., Shi, X., Xie, S., Sun, J., Liu, Z., Zhang, S., *et al.* (2022) Deep Learning Image Reconstruction in Pediatric Abdominal and Chest Computed Tomography: A Comparison of Image Quality and Radiation Dose. *Quantitative Imaging in Medicine and Surgery*, **12**, 3238-3250. <https://doi.org/10.21037/qims-21-936>
 - [25] Brady, S.L., Trout, A.T., Somasundaram, E., Anton, C.G., Li, Y. and Dillman, J.R. (2021) Improving Image Quality and Reducing Radiation Dose for Pediatric CT by Using Deep Learning Reconstruction. *Radiology*, **298**, 180-188. <https://doi.org/10.1148/radiol.2020202317>

-
- [26] Nagayama, Y., Sakabe, D., Goto, M., Emoto, T., Oda, S., Nakaura, T., *et al.* (2021) Deep Learning-Based Reconstruction for Lower-Dose Pediatric CT: Technical Principles, Image Characteristics, and Clinical Implementations. *RadioGraphics*, **41**, 1936-1953. <https://doi.org/10.1148/rg.2021210105>
- [27] Zhang, Z. and Seeram, E. (2020) The Use of Artificial Intelligence in Computed Tomography Image Reconstruction—A Literature Review. *Journal of Medical Imaging and Radiation Sciences*, **51**, 671-677. <https://doi.org/10.1016/j.jmir.2020.09.001>
- [28] El-Ali, A.M., Strubel, N., Pinkney, L., Xue, C., Dane, B. and Lala, S.V. (2024) Pediatric Contrast-Enhanced Chest CT on a Photon-Counting Detector CT: Radiation Dose and Image Quality Compared to Energy-Integrated Detector CT. *Pediatric Radiology*, **54**, 1984-1995. <https://doi.org/10.1007/s00247-024-06078-1>
- [29] Lee, J.S., Kim, J., Bapuraj, J.R. and Srinivasan, A. (2024) Comparison of Image Quality and Radiation Dose in Pediatric Temporal Bone CT Using Photon-Counting Detector CT and Energy-Integrating Detector CT. *American Journal of Neuroradiology*, **45**, 1322-1326. <https://doi.org/10.3174/ajnr.a8276>
- [30] Mese, I., Altintas Mese, C., Demirsoy, U. and Anik, Y. (2023) Innovative Advances in Pediatric Radiology: Computed Tomography Reconstruction Techniques, Photon-Counting Detector Computed Tomography, and Beyond. *Pediatric Radiology*, **54**, 1-11. <https://doi.org/10.1007/s00247-023-05823-2>
- [31] Higashigaito, K., Mergen, V., Eberhard, M., Jungblut, L., Hebeisen, M., Rätzer, S., *et al.* (2023) CT Angiography of the Aorta Using Photon-Counting Detector CT with Reduced Contrast Media Volume. *Radiology: Cardiothoracic Imaging*, **5**, e220140. <https://doi.org/10.1148/ryct.220140>