

泌尿系结石的影像学诊断进展

鲍泽坤^{1*}, 沈大庆^{2#}

¹济宁医学院临床医学院, 山东 济宁

²济宁医学院附属医院泌尿外科, 山东 济宁

收稿日期: 2024年8月10日; 录用日期: 2024年9月2日; 发布日期: 2024年9月12日

摘要

泌尿系结石是临床常见的泌尿系统的疾病, 其高患病率、高复发率的现状严重影响了患者的健康水平和生活质量。临床上主要表现为腰痛和血尿, 因结石大小、位置的不同, 症状也有所差异。对泌尿系结石进行快速且精确的诊断进而制定安全有效的治疗方案尤为重要。影像学技术的发展对泌尿系结石的诊断带来了巨大变革, 目前仍在不断优化和创新, 期待能够在精准诊断的同时降低患者的痛苦和经济负担, 实现更好的诊疗效果。

关键词

泌尿系结石, 影像学技术, B超, 双能CT, 低剂量CT, 个体化诊疗

Advances in Imaging Diagnosis of Urinary Calculi

Zekun Bao^{1*}, Daqing Shen^{2#}

¹School of Clinical Medicine, Jining Medical University, Jining Shandong

²Department of Urology, Affiliated Hospital of Jining Medical College, Jining Shandong

Received: Aug. 10th, 2024; accepted: Sep. 2nd, 2024; published: Sep. 12th, 2024

Abstract

Urinary calculi is a common disease of urinary system in clinic. Its high prevalence and recurrence rate seriously affect the health level and quality of life of patients. The main clinical manifestations are lumbago and hematuria, and the symptoms vary depending on the size and location of the stones. Rapid and accurate diagnosis of urinary calculi is particularly important to develop safe and

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 鲍泽坤, 沈大庆. 泌尿系结石的影像学诊断进展[J]. 临床个性化医学, 2024, 3(3): 744-751.

DOI: 10.12677/jcpm.2024.33107

effective treatment. The development of imaging technology has brought great changes to the diagnosis of urinary calculi, and it is still being continuously optimized and innovated. It is expected to reduce the pain and economic burden of patients while making accurate diagnosis, and achieve better diagnosis and treatment results.

Keywords

Urinary Calculi, Imaging Techniques, B Ultrasonic, Dual-Energy CT, Low-Dose CT, Individualized Diagnosis and Treatment

Copyright © 2024 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. 前言

泌尿系结石(urinary calculus)是泌尿外科的常见疾病,患病率和复发率高,研究表明我国成人患病率高达 6.5% [1], 尽管诊断及治疗技术不断发展,其 10 年复发率仍高达 52%, 结石成分以草酸钙为主的患者复发率更是高达 60%~80% [2] [3], 对患者的生活质量造成严重影响。目前根据泌尿系结石的晶体成分将其分为含钙结石、感染性结石、尿酸结石和胱氨酸结石四大类,确定结石的类型是结石患者诊断和治疗的重要一步[4] [5]。在诊断方面,随着影像学技术的不断发展,B 超、CT 等技术皆对泌尿系结石的诊断带来了极大帮助[6]-[8]。临床对于结石患者的治疗以外科手术和微创手术为主[9],尤其是近年来微创技术的高速发展,大幅度减少了结石患者的痛苦[10]。因此,对泌尿系结石患者进行精准诊断进而提供个体化的治疗方案尤为重要。本文将对泌尿系结石的影像学诊断进展进行综述。

在对患者的病史、症状、体征进行基本判断后,影像学检查是目前临床上最为常用的检查方法,主要包括 B 超、泌尿系统平片(plain film of kidneys ureters and bladder, KUB)、静脉尿路造影(intravenous urography, IVU)和腹部 CT 等。

2. B 超

超声具有简单、快捷、经济、无创等优势,是多种疾病的推荐诊断方式,对于肾结石的诊断,超声在诊断患者肾脏内结石的同时,还可对泌尿系统其他部位存在的结石及肾积水的情况进行有效筛查,为后续治疗计划提供较为全面的影像学依据[11]。研究发现,相较于传统的二维超声,彩色多普勒超声结合多普勒效应和彩色成像技术在提供器官和组织的形态信息的同时,通过探测结石引起的局部血流改变快闪伪像,对结石进行更加精准的诊断,也是在结石大小<5 mm 范围、5~10 mm 范围和>10 mm 范围的检出率均高于二维超声的原因[12]。相关试验表明,自定义多普勒模式调节较低的频率可增强闪烁信号并抑制血流信号,利用这一特性,测得人的结石的敏感性为 84%,且 44%的结石大小与相应的 CT 测量结果一致[13],尽可能避免了患者因 CT 检查遭受的辐射伤害,为设计个体化治疗方案提供了更高价值的资料。此外,例如平面波合成聚焦这种高端波束形成技术进一步减少了诊断结石大小的误差,而三维(3D)US 成像通过对结石进行表面渲染进而提供关于石头形态的独特信息,对结石的诊断及相关治疗进行了进一步的优化[14],两者未来皆有非常广阔的发展前景。

3. 泌尿系统平片(Plain Film of Kidneys Ureters and Bladder, KUB)

KUB 与 B 超同样有着简单、快捷、经济等优势,且辐射性相对较小,因此也是指南推荐的常规检查

方法, 临床上通常将两者结合以得到较为可观的灵敏度和特异性, 用于结石的诊断以及术前、术后的评估[15], 但与 B 超相比, 有明显局限性。由于绝大部分结石不能透过 X 线, 因此根据 KUB 显示的致密影可以对结石的位置、大小、数量及类型进行分析, 但越来越多的临床资料表明 KUB 仅对直径较大、位置较浅的结石有较高的诊断价值, 而对于直径较小或位置较为复杂的结石, KUB 提供的影像无法达到临床确诊的要求[16], 临床上常将 KUB 与静脉尿路造影(IVU)相结合使用以得到更有价值的影像资料。

4. 静脉尿路造影(Intravenous Urography, IVU)

静脉尿路造影又称排泄性尿路造影(excretory urogram)、静脉肾盂造影(intravenous pyelogram, IVP), 是指在注射造影剂后 10 分钟和 20 分钟后进行摄片, 实际是对泌尿系统平片的进一步优化, 使其提供更高的诊断价值。IVU 可以清晰显示全尿路的整体形态, 不仅可以对结石的诊断提供帮助, 还可以对泌尿系畸形及肾功能做出评估[17]。过去, IVU 作为诊断泌尿系结石的金标准广泛应用于临床, 甚至成为制定输尿管结石治疗计划的基础, 但由于造影剂的毒性和过敏性、图像质量易受身体条件的影响导致漏诊等缺陷, 已慢慢被更加先进的无增强螺旋 CT 等技术所取代[18][19]。尽管如此, IVU 仍然具有一定的诊断价值, 相关研究人员也在不断探索 IVU 的优化方式, 比如非加压低张静脉肾盂造影[20]、大剂量快速滴注碘对比剂等, 但大部分都难以达到理想效果, 其中比较成功的是将高压团注实时成像技术与静脉肾盂造影相结合, 临床实践表明, 这种改良不仅可以缩短检查时间, 从而减少患者受到的辐射伤害, 还可以提供更为清晰、全面的影像学资料[21], 使结石的诊断有了更好的依据。相关研究已经证明, IVU 有很高的特异性, 但敏感性远远不及 CT[22], 这也是 IVU 逐渐被 CT 取代的重要原因, 但临床数据表明, 将多层螺旋 CT(MSCT)与 IVU 联合使用对于输尿管结石的诊断尤为有效, 已在临床上广泛应用。MSCT 拥有扫描快、范围广、分辨率高、对微小病灶和早期结石的敏感性高等优点, 且 MSCT 多平面重建的影像结果极少受心率、呼吸等因素的影响, 进而降低出现伪影的概率, 将其与 IVU 联合应用, 为输尿管阴性小结石的诊断提供了极大帮助[23][24]。

5. 计算机断层扫描(Computed Tomography, CT)

CT 是指利用计算机成像技术展示人体的组织与病灶, 其操作简单、迅速, 不需要肠道准备, 图像结果处理方便且不易受外界因素影响, 分辨率高, 这些优点使其可以提供泌尿系统完整且清晰的图像, 从而对泌尿系结石及结石所处的临近组织的情况进行极为精确的诊断[8], 在临床中已广泛应用, 对于其它检查不能确诊的尿石症、不明原因的腰痛伴发热或孤立肾脏的患者, CT 更是起到了不可替代的诊断作用, 是必不可少的影像学检查[25]。但传统的 CT 检查辐射性较强, 安全性较低, 尤其对于儿童和孕妇患者要谨慎使用[26]。如何对 CT 进行优化从而使其更加安全有效是一直以来的热门研究领域。

随着研究人员的不断探索, 低剂量 CT (low-dose CT, LDCT)、超低剂量 CT (ultra-LDCT, ULDCT)逐渐在临床开展并流行, 由于管电流与辐射剂量呈正比, 研究人员通过尽可能降低管电流、增加螺距的方法降低 X 射线的辐射剂量, 使患者及影像科工作人员受到的辐射伤害最大程度降低, 同时通过临床资料发现 LDCT 的图像与常规剂量 CT 的图像相比, 低对比的组织分辨率降低, 肾盂肾盏成像效能欠佳, 但高对比的组织分辨率几乎没有差别[27][28], 仍可满足临床要求。为了进一步保证图像质量, 研究人员进一步将自适应统计迭代重建(Adaptive statistical iterative reconstruction, ASIR)技术应用于 LDCT。ASIR 是一种图像后处理技术, 能够尽可能模拟 CT 扫描时 X 射线的探测过程[29]。利用不同权重的 ASIR 进行重建, 进而抑制伪影和减弱噪声, 显著提高了图像质量, 实现了保证较高的图像质量的同时最大限度降低放射剂量[30][31]。此外, 还有一种原理、功能相似的技术为图像域迭代重建算法(image domain iterative reconstruction algorithm, IRIS), 可通过选择性识别并除去 X 线产生的噪声, 通过多次迭代减轻噪声、减

少伪影[32], 可达到与 ASIR 相似的效果。经过优化后的 LDCT、ULDCT 与常规剂量 CT 相比, 拥有时间短、操作方便、图像质量相似、辐射性大幅度降低但诊断准确性、敏感性和特异性仍较高等优点[33] [34], 目前国内外已经达成将其作为诊断泌尿系结石首选方法的共识[35]。ULDCT 也同样被证实可以代替 KUB、B 超及常规剂量 CT 去确认结石的存在和位置, 尤其对于较小或位于输尿管远端的结石, 效果更佳[36] [37]。但有研究发现, 身体质量指数(Body Mass Index, BMI)会影响 LDCT 和 ULDCT 的诊断效果, 应用于肥胖患者时不能达到满意的临床效果, 但在患者 BMI $\leq 30 \text{ kg/m}^2$ 时, LDCT 仍可作为首选检查[38]。但国外最近的研究表明, 低剂量 CT 在肥胖患者中可能是可行的[39], 但有待于更多的临床证据证实。低剂量 CT 仍有非常宽广的发展前景, 其局限性也在不断地被研究解决, 必将为临床工作提供更加优质的影像学资料。

增强 CT 是在传统 CT 检查的基础上, 口服或从手背、肘静脉注入 CT 专用造影剂的一种检查方法, 在泌尿系统中联合三维重建可进行 CT 尿路造影(CT urography, CTU)。CTU 可以有效避免骨、肌肉及肠道准备对诊断的不利影响, 从而清晰、立体显示泌尿系统的解剖结构, 对结石的诊断、良恶性肿瘤的鉴别及结石周围情况的了解提供了极大的帮助, 同时还可以了解肾脏代谢功能和实质病变[40] [41]。研究证明 CTU 的显影质量和诊断准确率均高于 IVP, 应用价值高, 值得推广使用[41] [42], 尤其是在计划实施输尿管镜下钬激光碎石术时, 为患者术前准备最适宜的 D-J 管提供了重要的参考资料, 大幅度提高了置管的安全性、顺利性, 减少患者的痛苦[43]。此外, 基于 CTU 的实时成像技术在临床上被用于评估经皮肾取石术(PCNL)的肾脏入路, 解决了患者仰卧位和俯卧位时肾脏位置变化导致的问题[44]。同样, CTU 也有缺陷, 比如辐射剂量大、价格较高、造影剂毒性等, 研究人员也在不断探究 CTU 的优化。研究发现, 在进行 CTU 时将真实平扫替代为光谱 CT 虚拟平扫(VNC), 既能获取高质量的图像, 又能降低对患者的辐射伤害, 同时还能对结石成分进行分析, 其原理为从增强扫描图像中移除碘剂, 从而减少辐射剂量[45]。超高端计算机断层扫描成像系统(GE 256 排 Revolution CT)尿路成像是将多层螺旋 CT 与静脉肾盂造影相结合, 也被证明对结石的诊断有较理想的效果[46]。此外, 64 排 CT 改良式尿路造影应用个性化分次团注的方法, 在保证高质量图像的同时, 使患者获得较高的安全性和舒适度, 为患者提供更加满意的诊疗体验[47]。

双能 CT (dual-energy CT, DECT) 是目前的热门研究领域, 其在泌尿系结石方面的作用更是不容小觑。DECT 是通过尽可能同时采集两种不同 X 射线管能量水平(通常为 80 kV 和 140 kV)的扫描数据, 从而提高图像分辨率得到高质量图像, 再通过标准探测器测量这两个能谱之间的 X 射线衰减差异, 对不同组织和材料的化学成分进行定义、区分或量化[48]。DECT 成像和后处理与传统的单能量 CT 成像相比, 患者的辐射剂量没有增加, 而图像更加精细, 目前在临床常规用于诊断、表征肾结石及诊断痛风, 且对于体重 $>118 \text{ kg}$ 的大体型患者也有可接受的效果[49]-[51]。上文提到, 目前泌尿系结石根据其成分大致分为四大类, 不同成分的结石有着不同的最佳临床治疗方式, 例如: 密度、硬度较大的结石目前推荐采用输尿管软镜碎石术(RIRS)、经皮肾镜取石术(PCNL)等手术治疗; 密度较低、易碎的结石目前主要以体外冲击波碎石术(ESWL)为主[52] [53]; 尿酸结石目前主要行保守治疗, 通过药物碱化尿液以到达溶解的效果, 避免了侵入性尿路介入手术或体外冲击波碎石术导致的伤害[54]。但大部分结石的成分不止一种, 而是一种混合状态, 因此, 对结石成分进行更加准确的分析进而给与患者个体化的治疗方案便尤为重要, 而 DECT 的不断发展逐渐解决了这个问题。DECT 通过测量低能和高能的衰减差异和比值对泌尿系结石进行分类, 国外相关研究证明, DECT 对尿路结石分类的特异性和敏感性接近 100%, 可以鉴别钙和非钙结石、草酸钙和磷酸钙结石, 其中区分尿酸与非尿酸结石的准确率为 75%~100%, 利用这个优势可以更早地进行碱化尿液治疗, 降低患者的医疗费用和痛苦[54]-[56]。若将准直光束宽度设置为 $2 \times 32 \times 0.6 \text{ mm}$, 自动曝光控制设置为 80/sn140 峰值电压, 片厚设置为 0.5/0.5 mm, DECT 检测尿路结石的灵敏度可以达

到最优, 可以对小型尿路结石患者和复杂结石的情况进行进一步分析[57]。临床研究发现, DECT 作为一种新型的无创成像技术, 通过与曲面重建(curve planar reformation, CPR)等后处理技术联合使用可提供输尿管解剖学特征的全面信息及输尿管结石形态、化学的准确预测, 已成为输尿管结石的首选检查[58][59]。目前, DECT 仍在不断优化, 近期研究发现, 将 DECT 双能量指数(dual energy index, DEI)、有效原子序数(effective atomic number, Zeff)、能谱曲线斜率相结合能够进一步提高泌尿系结石的准确率[60]。当前临床上所流行的 DECT 基本是指双源双能 CT, 研究人员在此基础上进行优化, 将双源替换为单源。研究发现, 一些特殊型号的单源能谱 CT 的管球和探测器拥有双层探测器、快速千伏切换等技术, 可以到达双能量采集的要求。单源 CT 管电压瞬时切换双能量成像只有一个 X 线球管, 通过高低能量快速切换瞬间实现体内双能量成像, 可以有效鉴别尿酸结石与非尿酸结石[53][61]。辐射剂量大是 CT 尿路造影(CTU)的显著局限, 并且在 CTU 的排泄期, 尿路结石通常与碘化造影剂难以区分, 进而导致误诊、漏诊[62]。DECT 可以尽可能去除 CT 图像中的碘化物质, 从而能够清晰地显示结石的情况, 但并不能完全除去高浓度碘化造影剂, 因此在 CTU 中的应用受到限制[63]; DECT 也可利用数据后处理技术从对比度增强采集中减去碘衰减, 进而产生虚拟非对比 CT (vNCT)取代真实非对比 CT (tNCT), 应用于 CTU 可以减少 CT 尿路造影的辐射剂量[64], 但目前仍有较大的局限性, 需要对 DECT 进行更加完善的优化、研究更加先进的数据图像后处理技术才能满足临床工作的要求[65]。尽管相关研究已经证明将 DECT 应用于 CTU 获得的虚拟无增强(VUE)图像可以精确诊断 ≥ 5 mm 的结石, 并且辐射剂量降低了 33%, 但图像质量较差, 对泌尿系结石的诊断敏感性较低, 对于 < 5 mm 的结石, 真实非增强(TUE) CT 的表现更能满足临床工作的要求[66]-[68]。

6. 磁共振(Magnetic Resonance, MR)、肾动态显像等

由于 MR 对泌尿系结石不敏感、价格昂贵, 且 B 超、CT 等相关技术的发展已基本能够满足诊断要求, 目前在临床上的应用相对较少, 但研究发现 MRI 在结石并发尿路上皮癌的情况下有更好的诊断价值[69]。当患者出现造影剂过敏、肾功能差的情况, 磁共振尿路成像(MR urography, MRU)可作为一种可行的备用选择。肾动态显像主要用于评估尿路梗阻及肾功能, 常作为术前、术后的辅助评估检查。

7. 总结与展望

随着生活方式及饮食结构的改变, 泌尿系结石高患病率、复发率已是现状, 且仍在继续上升, 如何对患者进行快速且精准的诊断进而提供个体化的治疗方案是迫切需要解决的问题。影像学检查作为诊断结石必不可少的手段, 多年来不断被优化和创新, 整体朝着高速度、高准确性、少辐射、少痛苦、少花费的方向发展, 为患者及医务人员带来了福音。但目前许多改良、创新的新兴技术发展仍不够完善, 有一定的局限性, 且缺少足够的临床证据支持, 无法广泛应用于临床。在未来, 进一步完善并发展更加安全有效的影像学检查方法是重中之重。影像学技术只是诊断手段, 深入探索泌尿系结石的病因及机制, 以此制定个体化的诊治计划并对大众进行健康宣教, 尽可能预防结石的形成, 才能更加有效地降低结石的患病率和复发率。

参考文献

- [1] 唐霞, 张犁. 代谢组学在泌尿系结石中的研究现状与展望[J]. 中医临床研究, 2024, 16(12): 128-131.
- [2] 俞国杰, 瓦热斯·先木西丁, 米尔扎提·麦麦提, 等. 复发性泌尿系结石成分变化及其影响因素分析[J]. 中华腔镜泌尿外科杂志(电子版), 2024, 18(3): 259-265.
- [3] 李堂, 潘正故, 刘敏, 等. 糖尿病与泌尿系结石关系的临床真实世界研究[J]. 右江医学, 2024, 52(5): 417-422.
- [4] Grases, F. and Costa-Bauza, A. (2021) Urinary Stone Diagnosis. Morphologic and Composition Analysis. *Archivos*

Espanoles de Urologia, **74**, 35-48.

- [5] Thongprayoon, C., Krambeck, A.E. and Rule, A.D. (2020) Determining the True Burden of Kidney Stone Disease. *Nature Reviews Nephrology*, **16**, 736-746. <https://doi.org/10.1038/s41581-020-0320-7>
- [6] 路以恒, 陈佳. 超声与 CT 检查诊断泌尿系结石的临床价值[J]. 影像研究与医学应用, 2024, 8(4): 172-174+177.
- [7] 李永好. CT 检查与超声检查诊断泌尿系结石对比分析[J]. 中国社区医师, 2019, 35(10): 119+122.
- [8] Osther, S.S., Andersen, K., Andersen, M., *et al.* (2023) Kidney Stone Disease.
- [9] 滑丽美, 邱建宏, 曹婧然, 等. 个性化营养治疗对泌尿系结石术后恢复及结石复发的影响[J]. 武警医学, 2024, 35(5): 417-420.
- [10] 娄静, 刘春梅, 程素玲. 阶段性心理护理在泌尿系结石中的应用效果[J]. 临床医学研究与实践, 2024, 9(13): 154-157.
- [11] 冀志强. 超声在肾结石诊断中的应用价值[J]. 中国城乡企业卫生, 2024, 39(4): 129-131.
- [12] 王欢. 彩色多普勒超声在泌尿系结石诊断及定位中的应用价值[J]. 现代医用影像学, 2023, 32(12): 2301-2304.
- [13] May, P.C., Haider, Y., Dunmire, B., Cunitz, B.W., Thiel, J., Liu, Z., *et al.* (2016) Stone-Mode Ultrasound for Determining Renal Stone Size. *Journal of Endourology*, **30**, 958-962. <https://doi.org/10.1089/end.2016.0341>
- [14] Dai, J.C., Bailey, M.R., Sorensen, M.D. and Harper, J.D. (2019) Innovations in Ultrasound Technology in the Management of Kidney Stones. *Urologic Clinics of North America*, **46**, 273-285. <https://doi.org/10.1016/j.ucl.2018.12.009>
- [15] Aguilar-Gisbert, L., Santos-Pérez de la Blanca, R. and Peña-Vallejo, E. (2021) Diagnóstico por imagen de la litiasis urinaria. *Archivos Espanoles de Urologia*, **74**, 24-34.
- [16] 吴泽文, 陈绮璐, 胡剑波, 等. CTU 与超声在肾盂输尿管重复畸形诊断中的对比研究[J]. 中国 CT 和 MRI 杂志, 2022, 20(12): 121-123.
- [17] 李焕敬, 张大光, 耿斌, 等. CT 尿路成像与超声、静脉肾盂造影在重复肾、重复输尿管畸形的诊断对比[J]. 海军医学杂志, 2024, 45(3): 296-300.
- [18] Straub, M., Bader, M. and Strittmatter, F. (2013) Management des Uretersteins. *Der Urologe*, **52**, 415-426. <https://doi.org/10.1007/s00120-013-3122-8>
- [19] Dhar, M. and Denstedt, J.D. (2009) Imaging in Diagnosis, Treatment, and Follow-Up of Stone Patients. *Advances in Chronic Kidney Disease*, **16**, 39-47. <https://doi.org/10.1053/j.ackd.2008.10.005>
- [20] 何锦江, 罗小平, 罗银灯. 非加压法静脉肾盂造影方法的评价与临床价值[J]. 重庆医科大学学报, 2009, 34(12): 1740-1742.
- [21] 杨桂林, 罗仕珍, 梁敏群. 改良静脉肾盂造影在泌尿系疾病诊断过程中的应用价值[J]. 黑龙江医药, 2021, 34(6): 1414-1416.
- [22] Shine, S. (2007) Urinary Calculus: IVU vs. CT Renal Stone? A Critically Appraised Topic. *Abdominal Imaging*, **33**, 41-43. <https://doi.org/10.1007/s00261-007-9307-0>
- [23] 张超. MSCT 多平面重建联合静脉肾盂造影在输尿管阴性小结石中的诊断分析[J]. 罕见疾病杂志, 2023, 30(1): 65-66.
- [24] 张伟红, 朱继兰, 彭静, 等. MSCT 联合静脉肾盂造影诊断输尿管结石的应用分析[J]. 医学影像学杂志, 2023, 33(10): 1930-1932.
- [25] Peters, J., Oswald, D., Eiben, C., Ramesmayer, C., Abenhardt, M., Sieberer, M., *et al.* (2024) Bildgebung bei Nephroureterolithiasis. *Die Urologie*, **63**, 295-302. <https://doi.org/10.1007/s00120-024-02297-4>
- [26] 赵月霞. 观察螺旋 CT 低剂量扫描诊断泌尿系结石的临床价值[J]. 影像研究与医学应用, 2022, 6(5): 104-106.
- [27] 殷赵华. CT 低剂量扫描在泌尿系统结石中的应用价值[J]. 现代医用影像学, 2024, 33(2): 344-347.
- [28] 杨金. 螺旋 CT 低剂量扫描对泌尿系结石患者的临床诊断[J]. 黑龙江医药科学, 2023, 46(1): 100-101.
- [29] 陈文敏. 多层螺旋 CT 常规平扫与低剂量扫描对泌尿系结石的诊断价值比较[J]. 基层医学论坛, 2023, 27(19): 91-93.
- [30] 宋丽. 低剂量 CT 技术用于泌尿系结石诊断中的价值[J]. 影像研究与医学应用, 2022, 6(2): 95-97.
- [31] Li, X., Shu, H., Zhang, Y., Li, X., Song, J., Du, J., *et al.* (2018) Low-Dose CT with Adaptive Statistical Iterative Reconstruction for Evaluation of Urinary Stone. *Oncotarget*, **9**, 20103-20111. <https://doi.org/10.18632/oncotarget.25047>
- [32] 于宝玉, 张斌, 张博洋, 等. 低剂量 CT 联合图像域迭代重建算法对泌尿系结石的诊断价值及结石成分分析[J]. 中国医学前沿杂志(电子版), 2022, 14(10): 31-35.

- [33] 葛广忠. 低剂量 CT 在泌尿系结石诊断中的诊断效能及对图像质量的影响[J]. 中国继续医学教育, 2021, 13(18): 110-115.
- [34] Rodger, F., Roditi, G. and Aboumarzouk, O.M. (2018) Diagnostic Accuracy of Low and Ultra-Low Dose CT for Identification of Urinary Tract Stones: A Systematic Review. *Urologia Internationalis*, **100**, 375-385. <https://doi.org/10.1159/000488062>
- [35] 李巧红, 张超, 秦丽蓉. 螺旋 CT 低剂量扫描在诊断泌尿系结石中的价值[J]. 影像研究与医学应用, 2021, 5(17): 179-180.
- [36] Raskin, D., Winkler, H., Kleinmann, N., Schor-Bardach, R., Guranda, L., Muzikansky, G., et al. (2020) Very Low-Dose Computerized Tomography for Confirmation of Urinary Stone Presence. *World Journal of Urology*, **39**, 233-238. <https://doi.org/10.1007/s00345-020-03142-x>
- [37] Cheng, R.Z., Shkolyar, E., Chang, T.C., Spradling, K., Ganesan, C., Song, S., et al. (2020) Ultra-Low-Dose CT: An Effective Follow-Up Imaging Modality for Ureterolithiasis. *Journal of Endourology*, **34**, 139-144. <https://doi.org/10.1089/end.2019.0574>
- [38] 周子健, 吴忠. CT 在泌尿系结石诊疗中的应用进展[J]. 中华腔镜泌尿外科杂志(电子版), 2023, 17(3): 299-302.
- [39] Nestler, T., Haneder, S. and Hokamp, N.G. (2019) Modern Imaging Techniques in Urinary Stone Disease. *Current Opinion in Urology*, **29**, 81-88. <https://doi.org/10.1097/mou.0000000000000572>
- [40] 曾官红. CTU 在输尿管镜下软激光碎石术中的指导作用[J]. 中国实用医药, 2022, 17(9): 71-73.
- [41] 张道恩, 汪清建, 钟小兵, 等. CTU 与 IVP 在泌尿系疾病成像的应用比较[J]. 医学信息, 2020, 33(20): 159-161.
- [42] 巫程泉. 多层螺旋 CT 泌尿系统成像的临床使用价值[J]. 现代医用影像学, 2022, 31(10): 1894-1896.
- [43] 张雪瑞. CT 泌尿系成像在输尿管结石临床诊治中的应用价值[J]. 黑龙江医学, 2024, 48(1): 56-58.
- [44] Masarwe, I., Savin, Z., Rabinowich, A., Lifshitz, K., Herzberg, H., Marom, R., et al. (2022) Querying the Significance of Patient Position during Computerized Tomography on the Reliability of Pre-Percutaneous Nephrolithotomy Planning. *World Journal of Urology*, **40**, 1553-1560. <https://doi.org/10.1007/s00345-022-03990-9>
- [45] 汤朝晖, 张建生, 陈洋. 光谱 CT 虚拟平扫在泌尿系结石 CT 尿路造影中的应用价值[J]. 中华腔镜泌尿外科杂志(电子版), 2022, 16(3): 244-247.
- [46] 王新达, 林钱森. 超高端计算机断层扫描成像系统尿路成像在泌尿系结石诊断中的应用[J]. 中国医疗器械信息, 2024, 30(1): 113-115.
- [47] 王伟, 肖静, 陈超凡. 泌尿系结石患者应用 64 排 CT 改良式尿路造影的临床效果评价[J]. 影像研究与医学应用, 2024, 8(3): 73-75.
- [48] Furlow, B. (2015) Dual-Energy Computed Tomography. *Radiologic Technology*, **86**, 301ct-21ct.
- [49] Kaza, R.K., Ananthakrishnan, L., Kambadakone, A. and Platt, J.F. (2017) Update of Dual-Energy CT Applications in the Genitourinary Tract. *American Journal of Roentgenology*, **208**, 1185-1192. <https://doi.org/10.2214/ajr.16.17742>
- [50] Kordbacheh, H., Baliyan, V., Uppot, R.N., Eisner, B.H., Sahani, D.V. and Kambadakone, A.R. (2019) Dual-Source Dual-Energy CT in Detection and Characterization of Urinary Stones in Patients with Large Body Habitus: Observations in a Large Cohort. *American Journal of Roentgenology*, **212**, 796-801. <https://doi.org/10.2214/ajr.18.20293>
- [51] 张智勇, 林素仙, 杨美绿, 等. 双能 CT 对痛风患者尿路结石的成分分析[J]. 中国现代医生, 2023, 61(2): 48-51.
- [52] 肖华, 陈清蓉, 王成军, 等. 双源 CT 在泌尿系结石成分分析中的应用[J]. 中国继续医学教育, 2021, 13(17): 121-124.
- [53] 张莹, 朱海峰. 单源双能 CT 识别体内泌尿系结石成分的临床价值[J]. 临床泌尿外科杂志, 2023, 38(7): 514-518.
- [54] Mansouri, M., Aran, S., Singh, A., Kambadakone, A.R., Sahani, D.V., Lev, M.H., et al. (2015) Dual-Energy Computed Tomography Characterization of Urinary Calculi: Basic Principles, Applications and Concerns. *Current Problems in Diagnostic Radiology*, **44**, 496-500. <https://doi.org/10.1067/j.cpradiol.2015.04.003>
- [55] Appel, E., Thomas, C., Steuwe, A., Schaarschmidt, B.M., Brook, O.R., Aissa, J., et al. (2021) Evaluation of Split-Filter Dual-Energy CT for Characterization of Urinary Stones. *The British Journal of Radiology*, **94**, Article 20210084. <https://doi.org/10.1259/bjr.20210084>
- [56] McGrath, T.A., Frank, R.A., Schieda, N., Blew, B., Salameh, J., Bossuyt, P.M.M., et al. (2020) Diagnostic Accuracy of Dual-Energy Computed Tomography (DECT) to Differentiate Uric Acid from Non-Uric Acid Calculi: Systematic Review and Meta-Analysis. *European Radiology*, **30**, 2791-2801. <https://doi.org/10.1007/s00330-019-06559-0>
- [57] Jung, J., Shin, J., Choi, H., Pak, S., Yang, H. and Yoon, B.I. (2023) Optimal Dual-Energy Computed Tomography Scan Parameters to Detect Small-Sized Urinary Stones and Their Composition. *Urolithiasis*, **51**, Article No. 54. <https://doi.org/10.1007/s00240-023-01419-5>

- [58] 石海兵, 周卫丽, 尤淑芳. 双源CT双能量成像联合曲面重建技术在输尿管结石诊断中的应用[J]. 罕少疾病杂志, 2022, 29(5): 72-73.
- [59] Singh, A., Khanduri, S., Khan, N., Yadav, P., Husain, M., Khan, A.U., *et al.* (2020) Role of Dual-Energy Computed Tomography in Characterization of Ureteric Calculi and Urinary Obstruction. *Cureus*, **12**, e8002. <https://doi.org/10.7759/cureus.8002>
- [60] 孙宁, 邱琦蕾, 吴雨雪, 等. 基于双能量CT中双能量指数、原子序数结合能谱曲线斜率对于鉴别泌尿系结石成分的价值研究[J]. 中国医学装备, 2024, 21(3): 53-57.
- [61] 孙鹏飞. 单源CT双能量成像技术术前预测体内泌尿系结石成分的价值[D]: [硕士学位论文]. 广州: 广州医科大学, 2022.
- [62] Cellina, M., Cè, M., Rossini, N., Cacioppa, L.M., Ascenti, V., Carrafiello, G., *et al.* (2023) Computed Tomography Urography: State of the Art and Beyond. *Tomography*, **9**, 909-930. <https://doi.org/10.3390/tomography9030075>
- [63] Feng, P., Li, G. and Liang, P. (2023) The Value of Dual-Energy Computed Tomography (DECT) in the Diagnosis of Urinary Calculi: A Systematic Review and Meta-Analysis of Retrospective Studies. *Peer Journal*, **11**, e16076. <https://doi.org/10.7717/peerj.16076>
- [64] McCoombe, K., Dobeli, K., Meikle, S., Llewellyn, S. and Kench, P. (2022) Sensitivity of Virtual Non-Contrast Dual-Energy CT Urogram for Detection of Urinary Calculi: A Systematic Review and Meta-Analysis. *European Radiology*, **32**, 8588-8596. <https://doi.org/10.1007/s00330-022-08939-5>
- [65] Gezer, M., Karaca, L., Özdemir, Z., Kahraman, A., Oğuz, F., Erbay, M.F., *et al.* (2023) Use of Dual Energy CT Urography in Evaluation of Urinary Stone and Complex Cyst. *Turkish Journal of Medical Sciences*, **53**, 264-272. <https://doi.org/10.55730/1300-0144.5581>
- [66] Xiao, J.M., Hippe, D.S., Zecevic, M., Zamora, D.A., Cai, L.M., Toia, G.V., *et al.* (2021) Virtual Unenhanced Dual-Energy CT Images Obtained with a Multimaterial Decomposition Algorithm: Diagnostic Value for Renal Mass and Urinary Stone Evaluation. *Radiology*, **298**, 611-619. <https://doi.org/10.1148/radiol.2021192448>
- [67] Cheng, Y., Sun, J., Li, J., Han, Y., Zhang, X., Zhang, L., *et al.* (2022) The Added Value of Virtual Unenhanced Images Obtained from Dual-Energy CT Urography in the Detection and Measurement of Urinary Stone. *Urology*, **166**, 118-125. <https://doi.org/10.1016/j.urology.2022.02.029>
- [68] Cheng, Y., Zhang, L., Cao, L., Zhang, X., Qu, T., Li, J., *et al.* (2023) Detection and Characterization of Urinary Stones Using Material-Specific Images Derived from Contrast-Enhanced Dual-Energy CT Urography. *The British Journal of Radiology*, **96**, Article 20230337. <https://doi.org/10.1259/bjr.20230337>
- [69] 牟江宁, 张广涛, 马永宏, 等. 三种方法对泌尿系结石合并尿路上皮癌的诊断价值比较[J]. 宁夏医科大学学报, 2022, 44(2): 167-170.