doi 10.12122/j.issn.1674-4500.2026.05.19 分子影像学杂志, 2026, 49(5): 690-694

心脏CT成像在卵圆孔未闭诊疗中的研究进展

杨静怡[1],张 继[2]
[1]南京医科大学泰州临床医学院,江苏 泰州 225300;[2]南京医科大学附属泰州人民医院医学影像科,江苏 泰州 225300

摘要:卵圆孔未闭是一种常见的先天性心脏异常,在约1/4的成年人中存在,虽多数无明显症状,但与隐源性卒中、偏头痛等多种疾病密切相关。经食管超声心动图结合右心声学造影及充分的激发试验被认为是诊断卵圆孔未闭的影像学金标准成像方式,但存在诸多局限性。心脏CT成像凭借其高分辨率及多平面重建能力,在卵圆孔未闭诊断评估中展现出独特优势。本文系统综述了心脏CT在PFO诊断、解剖分型、术前评估、病因筛查及术后随访中的研究进展,提出基于CT的影像评估临床路径,并分析现有局限与未来方向,以期为心脏CT在PFO诊疗中的合理应用及后续研究提供证据支持。
关键词:卵圆孔未闭;心脏CT成像;解剖分型;临床路径

Research progress of cardiac CT imaging in the diagnosis and treatment of patent foramen ovale

YANG Jingyi[1], *ZHANG Ji*[2]
[1]Taizhou School of Clinical Medicine, Nanjing Medical University, Taizhou 225300, China; [2]Department of Medical Imaging, The Affiliated Taizhou People's Hospital of Nanjing Medical University, Taizhou 225300, China

Abstract: Patent foramen ovale is a common congenital heart defect found in approximately one in four adults. Although most cases are asymptomatic, PFO is closely associated with various conditions, including cryptogenic stroke and migraine. Transoesophageal echocardiography combined with right heart contrast echocardiography and comprehensive provocation testing is considered the gold standard for the diagnosis of PFO; however, this approach has several limitations. Cardiac computed tomography, with its high resolution and multi-planar reconstruction capabilities, offers unique advantages in the diagnosis and assessment of PFO. This article systematically reviews the research progress of cardiac CT in the diagnosis, anatomical classification, preoperative assessment, etiological screening, and postoperative follow-up of PFO, proposes an imaging evaluation clinical pathway based on CT, and analyzes the existing limitations and future directions, with the aim of providing evidence support for the rational application of cardiac CT in the diagnosis and treatment of PFO and subsequent research.
Keywords: patent foramen ovale; cardiac CT imaging; anatomical classification; clinical pathway

卵圆孔未闭(PFO)是原发隔和继发隔融合不全的一种先天性心脏异常,约1/4的成年人存在PFO[1,2]。大多数情况下,PFO患者无明显症状,但PFO与多种临床病症相关联,如隐源性卒中[3]、继发性偏头痛[4]、减压病[5]、高原病[6]、斜卧呼吸-直立型低氧血症[7]等,统称为PFO相关综合征。

正常情况下,左心房压力高于右心房,但咳嗽、打喷嚏、大笑、Valsalva动作或肺动脉高压等状态时,右心房压力短暂升高超过左心房,原发隔摆动使PFO开放,出现右向左分流(RLS),此时来自静脉系统的栓子可进入动脉系统,导致反常栓塞,继而引发严重后果,如脑卒中[8,9]。

经食管超声心动图(TEE)结合右心声学造影(ASCE)及充分的激发试验被认为是诊断PFO的金标准成像方式[10,11],其敏感度和特异度均高[12],然而TEE是半侵入性检查,对部分患者属于禁忌证,如食管静脉曲张、食管狭窄等。经胸超声心动图(TTE)结合ASCE目前临床应用较广[13,14],但阳性率不及TEE[15],且易受患者体型、肺气影响。此外,超声检查受到操作技术和图像质量的影响,也会导致假阴性结果的出现。

随着心脏CT成像技术的普及,许多PFO被意外发现,心脏CT作为一种快速、无创、高空间分辨率的成像技术,在PFO诊断与评估中得到应用。目前关于PFO影像学评估的综述多聚焦于超声心动图的诊断效能及应用,对心脏CT的探讨往往局限于其作为补充检查的资料汇总,缺乏对心脏CT全流程价值的整合述评、临床应用时影像选择策略,以及前沿技术的深度展望。本文旨在系统梳理心脏CT在PFO诊断、分型、风险评估、诊疗流程、随访中的应用进展,提出基于CT的影像学评估路径,推动心脏CT在PFO诊疗中规范化、精准化应用。

1 心脏CT在PFO诊断与解剖分型中的应用

1.1 心脏CT诊断PFO的直接征象

心脏CT扫描后可以获得全心动周期的图像,并选

收稿日期:2025-12-31
基金项目:江苏省333高层次人才科研基金资助项目(BRA2020193)
作者简介:杨静怡,在读硕士研究生,E-mail: jingyi_yang1113@163.com
通信作者:张 继,主任医师,E-mail: zj00151@126.com

择不同时相的图像进行多平面重建，以四腔心切面为参照，在卵圆孔水平获得垂直于房间隔的斜矢状位图像，可清晰显示PFO。全心动周期以R-R间期的10%为间隔重建，以0%为心房收缩期的起始，30%~40%为收缩晚期，70%~80%为舒张中期。研究表明，在约70%时相重建的图像能最清晰地显示卵圆孔区域的解剖细节，是诊断PFO的最佳时相选择[16-18]。基于此技术，有研究首次提出了心脏CT诊断PFO的3个直接征象，该研究对214例患者进行了回顾性分析，其中20例同时接受了TEE检查，结果显示，当同时满足：(1)左心房原发隔位置存在明显的“皮瓣”、(2)原发隔与继发隔间存在对比剂通道、(3)从通道处发出向右房的射流束这3个标准时，心脏CT检测PFO的特异度将达到100%[19]，这一研究成果为后续研究提供了重要的方法学参考，多个研究沿用了上述3个征象作为诊断PFO的依据[20, 21]。但也有学者持不同意见，认为当图像同时满足(1)+(2)或(1)+(3)时即可诊断PFO[17]。

后续有学者对心脏CT诊断PFO的效能进行量化验证。一项对152例患者的研究显示，有21例患者检测到左向右的造影剂射流，其中19例在TEE中得到证实，敏感度为73.1%，特异度为98.4%，特异度较高；同时，有38例患者被观察到在房间隔位置存在通道样的外观，但仅有20例在TEE中被证实，敏感度为76.9%，特异度为85.7%，其敏感度较高[22]。也有研究[23]结果与上述研究[22]相似。综合现有证据，如果单独使用通道样外观作为诊断标准，心脏CT的敏感度较高但特异度却较低，这可能是因为卵圆孔瓣膜未完全融合，实际并未形成真实存在的通道，从而造成假阳性。虽然超声造影是诊断PFO金标准，但临床实践中，对于超声显影不佳或禁忌证患者，联合心脏CT的通道及射流征象可平衡诊断敏感度与特异度，是诊断PFO的重要无创策略。

1.2 心脏CT对PFO解剖分型的应用

心脏CT凭借其高分辨率成像，能够对PFO进行精细的解剖测量，从而有效识别PFO分型，提示临床选择合适的治疗方式。PFO可分为简单型与复杂型[24]，复杂型PFO通常与更高的卒中复发风险相关[25]，可概括为以下3种情况：

第1种是隧道结构异常，包括长隧道型PFO和左房多出口型PFO，其中长隧道型PFO(通道长度≥8 mm)是最常见的复杂型[26]，其冗长的通道结构易导致封堵器展开不全或移位，并且封堵术后残余分流概率高[27]。

第2种是房间隔异常，房间隔膨出瘤(ASA)定义为房间隔在右心房和左心房之间偏移总和≥10 mm[28, 29]，一项使用TEE的研究发现，ASA在卒中患者中出现的频率高于无卒中的患者[30]，同样有研究显示，当ASA与PFO共存时，卒中事件的发生率提高[31, 32]，可能是由于合并ASA的PFO通道开放的频率更高、开口直径更大导致RLS更易发生。此外有研究中房间隔偏移<10 mm被定义为房间隔微动脉瘤，与ASA一同被记录，统称为房间隔冗余现象[33]。研究发现，房间隔冗余现象与PFO共存时，临床表现为TIA、头晕、晕厥的患者与其他临床表现的患者数量具有显著差异。因此，心脏CT发现的房间隔异常具有直接临床意义，一旦经检查发现房间隔异常的存在，应对临床做出提示以采取相应措施。除此之外，继发隔肥厚(厚度≥10 mm)也会增加封堵难度及术后残余分流的风险。

第3种为毗邻结构异常，欧氏瓣肥大或希阿里网残留等结构，紧邻PFO的右心房侧开口，可能会干扰封堵器的释放与稳定贴合。尽管超声是观察这些膜性结构的传统方法，但曾有个案报道证实，通过多平面重建的心脏CT能够清晰地显示欧氏瓣区域的异常病变(如囊肿)，并在鉴别诊断中考虑到希阿里网[34]。这表明，心脏CT具备识别这些结构的潜力，尤其适用于超声显示不佳或解剖复杂的病例。

从临床角度看，PFO的解剖分型比单纯诊断更具决策意义。超声往往只能提供二维切面，而心脏CT的多平面重建技术能够将长隧道、多出口、房间隔异常以及合并复杂膜性结构等高危特征进行立体化呈现，从而对PFO进行精准解剖分型，为风险分层提供客观依据，直接决定了是否需要手术以及封堵器型号的选择。

1.3 心脏CT评价PFO左向右分流

心房间的分流双向皆可发生[35]，在静息状态下，由于左心房压力高于右心房，心脏CT可通过测量左房向右房的造影剂射流长度来对PFO的分流程度进行分级。有学者提出将PFO根据心脏CT测量的射流长度进行分级，长度<1 cm为1级，1~2 cm为2级，>2 cm为3级，可以测量出静息状态下左向右分流的等级，该分级方法首次将PFO的解剖特征与分流功能直接关联，为PFO的CT影像学研究提供了量化标准，同时该分级方法为临床提供了风险分层依据[28]。研究发现，通道长度与分流存在显著关联，较短的通道长度往往伴随着更高频率的左向右分流。同时心脏CT检测左向右分流血流可作为急性脑卒中患者PFO的诊断工具，可以用于检测急性卒中并发症高风险患者的PFO[17]。

由于心脏CT在检测时需要控制心率并保持静止，故在观察心房间右向左分流方面具有局限性。一项对261例英国患者的研究表明，心脏CT检测PFO的总体患病率与TEE相近，但TEE检测的右向左分流与心脏CT检测的左向右分流分级后，不同分级的PFO占比存在差异[20]；有研究支持了上述观点，提示心脏CT与TEE在诊断PFO方面各具特点并可相互补充，临床医生应根据患者的具体情况和所需评估的重点选择合适的影像学方法或联合应用，以更全面地评估患者的风险[36]。总之，CT所显示的静息状态左向右分流不仅是诊断依据，

更是心房间压力差的物理映射，未来如何通过CT测算的静息特征来预测激发态下的RLS功能等级，实现解剖评估到功能评估的转化，是亟待突破的学术盲点。

2 心脏CT在PFO诊疗流程中的应用价值与临床路径

2.1 心脏CT对PFO患者术前指导

多项研究显示，经皮PFO封堵术在预防卒中复发风险方面优于药物治疗[37-40]，这使得精准识别适合封堵治疗的患者至关重要。目前临床倾向于基于解剖结构特征的个体化风险评估。例如，有研究提出的评分系统，将与隐源性卒中相关的高风险解剖特征具体化为：长隧道型PFO、高活动度房间隔、冗长的下腔静脉瓣或希阿里网、Valsalva动作下大量RLS以及小夹角PFO。该系统将每项特征计为1分，当总分≥2分时，判断PFO与卒中相关的特异度可达81%，敏感度为91%[41]。这些高危解剖特征本质上多与复杂型PFO重合，它们通过影响局部血流动力学，显著增加了心腔内血栓形成及后续发生反常栓塞的风险。

PFO作为三维解剖结构，其实际大小，包括PFO的长度、宽度和高度常被TEE等超声检查手段低估[42]，这将直接影响风险评估的准确性与治疗方案的选择。而心脏CT的优势在于能精确量化隧道长度、隧道直径、心房开口长度、左向右分流程度[21, 28, 43]等，并将它们整合在二维重建图像中。有研究使用3DSlicer软件对PFO的通道空间进行涂抹勾画，将其量化成PFO通道体积，并研究体积与分流量的关系[44]。这种立体化的评估，使得临床医生能够更准确地预判介入治疗的技术难度，识别出卒中风险更高的患者群体，从而为选择最合适的封堵器械、规划最优的释放位置提供了至关重要的影像学依据。

2.2 心脏CT对PFO的病因筛查

美国神经病学学会指南明确指出，拟行PFO封堵术的患者应进行全面评估以排查卒中的其他发病机制[2]。在因隐源性卒中疑似PFO而接受检查的患者中，心脏CT可帮助排除其他心源性或肺源性栓塞病因。中老年隐源性卒中患者常合并动脉粥样硬化性心血管疾病风险因素[45]。心脏CT能清晰显示冠状动脉的解剖结构，准确评估是否存在冠状动脉粥样硬化斑块、斑块性质、管腔狭窄程度及钙化积分，这些是心源性栓塞的重要潜在来源。同时，心脏CT能够评估是否患者伴有心室增大、心肌肥厚、肺动脉高压、肺动静脉瘘及左心耳是否存在血栓等疾病征象，这些发现对于明确卒中的真正病因、制定正确的抗栓或治疗方案至关重要，避免了因误诊为PFO相关卒中而进行不必要的封堵手术。

2.3 心脏CT对PFO术后随访的作用

PFO封堵术后随访主要使用TTE结合ASCE检查，观察重点是评估封堵器在位情况与残余分流。心脏CT同样可作为PFO封堵术后随访的工具，可清晰显示封堵器的形态、位置及其与周围心脏结构的关系，通过三维重建，可直观判断封堵器是否完全展开、在位，通过观察对比剂的分流情况，也能为评估残余分流提供有价值的信息。此外，心脏CT可以高效识别PFO封堵术后并发症，包括围术期及远期并发症，如心包填塞、气胸、封堵器移位或栓塞、复发性神经系统事件等[46-49]，例如有文献报道了1例罕见但十分严重的PFO封堵器脱位病例，心脏CT可以提供脱位的封堵器位置及周围组织情况以协助临床手术[50]，对于此类术后危急或其他经胸超声显示不清、疑诊的严重并发症，心脏CT可作为优先考虑的手段。

2.4 基于心脏CT的PFO影像评估临床路径建议

综合前文所述，心脏CT在PFO诊疗中主要承担诊断筛查、解剖分型、术前规划及并发症排查的任务，但其无法有效评估激发状态下的右向左分流。因此，CT不应替代超声，而应作为互补工具。基于现有证据，本文尝试提出以下临床整合路径。

隐源性卒中患者的病因筛查路径：对于怀疑心源性栓塞的卒中患者，尤其合并冠心病危险因素的中老年人，可优先行心脏CT一站式检查。若CT发现明确的大动脉粥样硬化、左心耳血栓或其他栓塞来源，则PFO可能为偶然合并，避免直接归因；若CT仅显示高危PFO解剖特征，则进一步行TTE结合ASCE确认右向左分流程度。

PFO封堵术的术前规划路径：对已确诊且拟行封堵的患者，建议加做心脏CT进行三维解剖测量。CT可精确测量隧道长度、隧道直径、射流长度等参数，预测封堵器型号及释放难度，尤其适用于复杂型PFO，有助于降低术后残余分流及封堵器移位风险，且能弥补超声易低估尺寸的缺陷。

术后随访的按需使用路径：常规随访以TTE结合ASCE为主，心脏CT不作为常规手段。仅当临床高度怀疑封堵器侵蚀、移位、血栓形成或残余分流，而超声显示不清时，再行CT检查以明确诊断，指导再次干预。

上述路径中CT的核心价值在于提供高精度解剖信息，而右向左分流的功能分级仍需依赖右心声学造影。临床医生应根据具体问题灵活选择或组合影像手段，实现个体化评估。

3 局限与挑战

心脏CT在PFO诊疗中虽具有显著优势，但其临床应用仍面临多方面的局限与挑战。

首先，在功能评估方面存在固有不足。心脏CT的核心优势在于高分辨率解剖成像，但无法有效评估RLS，RLS的检出依赖于Valsalva等激发试验，而CT扫描过程中患者无法配合完成标准的激发动作，这是CT

与超声相比最根本的功能性短板。

其次，缺乏基于CT的专用风险分层工具。尽管CT能清晰显示长隧道、房间隔膨出瘤、继发隔肥厚等高危解剖特征，但目前国际上尚无公认的、基于CT定量参数的PFO卒中风险评分系统。现有评分多融合超声功能参数与临床信息，限制了CT解剖数据的独立风险预测价值。

最后，辐射暴露与扫描方案的矛盾。目前广泛应用的回顾性心电门控扫描因采集整个心动周期数据而导致辐射剂量相对较高。虽然前瞻性心电门控技术能大幅降低剂量[51]，但现有初步研究提示其对PFO的检测敏感性不高[52]。因此，如何在低辐射剂量与高诊断准确性间取得平衡，仍需优化扫描参数与重建算法。

4 小结与展望

心脏CT成像作为一种重要的无创影像学工具，已深入PFO诊断、分型、风险分层、术前规划、病因鉴别、术后随访全流程，与TEE形成了有效的互补。尽管仍有许多挑战，但未来心脏CT可以在以下3个方面进一步应用于PFO的临床诊疗：

人工智能驱动的自动化风险模型：深度学习算法可自动分割房间隔、量化PFO隧道相关解剖参数，并提取肉眼难以识别的纹理特征，减少人工测量的观察者间差异，从而构建标准化的CT高危特征数据库。基于大样本数据训练，可建立基于CT影像的PFO相关卒中风险预测模型，填补当前评分体系的空白。

光子计数CT的发展：该技术可显著提升图像质量或降低辐射剂量[53]。这一技术优势对于PFO通道的精细显示和复杂型PFO的解剖评估具有重要潜力。需要指出的是，该技术对PFO诊断的确切价值尚需临床研究验证。

心脏CT与超声多模态融合：CT提供高精度解剖信息却无法评估右向左分流，超声擅长功能评估但视野局限，未来若能将CT解剖数据融入，实现解剖与功能融合，构建标准化的多模态整合规范，则有望实现PFO术前精准风险分层与个体化封堵方案制定。

综上所述，未来心脏CT对于PFO的临床转化尚需验证，但本文已为心脏CT从“解剖补充”迈向“解剖-功能一体化评估”指明了可行路径。放射科医生应主动掌握PFO的CT征象与临床意义，心脏科医生应理解CT的优势与局限，通过多学科协作，实现PFO患者的个体化精准管理。

参考文献：

[1] Hara H, Virmani R, Ladich E, et al. Patent foramen ovale: current pathology, pathophysiology, and clinical status[J]. J Am Coll Cardiol, 2005, 46(9): 1768-76.

[2] Messé SR, Gronseth GS, Kent DM, et al. Practice advisory update summary: Patent foramen ovale and secondary stroke prevention: Report of the Guideline Subcommittee of the American Academy of Neurology[J]. Neurology, 2020, 94(20): 876-85.

[3] Campbell BCV, Khatri P. Stroke[J]. Lancet, 2020, 396(10244): 129-42.

[4] Trabattoni D, Brambilla M, Canzano P, et al. Migraine in patients undergoing PFO closure characterization of a platelet-associated pathophysiological mechanism: the LEARNER study[J]. JACC Basic Transl Sci, 2022, 7(6): 525-40.

[5] Orsinelli DA, Rajpal S. Doing a deep dive on patent foramen ovale stay tuned in the PFO world[J]. JACC Cardiovasc Imaging, 2022, 15(2): 190-2.

[6] West BH, Fleming RG, Al Hemyari B, et al. Relation of patent foramen ovale to acute mountain sickness[J]. Am J Cardiol, 2019, 123(12): 2022-5.

[7] Kashfi S, Blumfield A, Singh A. Platypnea-orthodeoxia syndrome secondary to large patent foramen ovale and aortic root dilatation [J]. J Am Coll Cardiol, 2024, 83(13): 3875.

[8] Seeger J, Hildick-Smith D. Patent foramen ovale closing the gap of indications for closure: time for a patient-tailored therapy[J]. JACC Cardiovasc Interv, 2020, 13(23): 2753-4.

[9] Kim JS, Thijs V, Yudi M, et al. Establishment of the heart and brain team for patent foramen ovale closure in stroke patients: an expert opinion[J]. J Stroke, 2022, 24(3): 345-51.

[10] 经食管超声心动图临床应用中国专家共识专家组. 经食管超声心动图临床应用中国专家共识[J]. 中国循环杂志, 2018, 33(1): 11-23.

[11] Song JK. Pearls and pitfalls in the transesophageal echocardiographic diagnosis of patent foramen ovale[J]. J Am Soc Echocardiogr, 2023, 36(9): 895-905. e3.

[12] 彭 源, 刘曼薇, 方凌云, 等. 经食管与经胸超声心动图造影诊断卵圆孔未闭及右向左分流[J]. 中国医学影像技术, 2021, 37(12): 1775-8.

[13] Bernard S, Churchill TW, Namasivayam M, et al. Agitated saline contrast echocardiography in the identification of intra- and extracardiac shunts: connecting the dots[J]. J Am Soc Echocardiogr, 2021, 34(1): 1-12.

[14] 王 浩, 吴伟春, 施怡声, 等. 卵圆孔未闭右心声学造影中国专家共识[J]. 中国循环杂志, 2022, 37(5): 449-58.

[15] Yang XX, Wang H, Wei YJ, et al. Diagnosis of patent foramen ovale: the combination of contrast transcranial Doppler, contrast transthoracic echocardiography, and contrast transesophageal echocardiography[J]. BioMed Res Int, 2020, 2020: 8701759.

[16] 陈晓艺, 彭礼清, 刘 静, 等. 双源计算机断层扫描评价卵圆孔未闭在心动周期中的动态特征[J]. 心血管病学进展, 2019, 40(4): 645-9.

[17] Lee S, Kim IC, Kim YD, et al. The role of cardiac CT throughout the full cardiac cycle in diagnosing patent foramen ovale in patients with acute stroke[J]. Eur Radiol, 2021, 31(12): 8983-90.

[18] 周 娣, 马小静, 熊青峰, 等. 双源冠状动脉CT血管造影在卵圆孔未闭诊断中的价值分析[J]. 中国循环杂志, 2022, 37(9): 935-9.

[19] Williamson EE, Kirsch J, Araoz PA, et al. ECG-gated cardiac CT angiography using 64-MDCT for detection of patent foramen ovale [J]. Am J Roentgenol, 2008, 190(4): 929-33.

[20] Purvis JA, Morgan DR, Hughes SM. Prevalence of patent foramen ovale in a consecutive cohort of 261 patients undergoing routine “coronary” 64-multi-detector cardiac computed tomography[J]. Ulster Med J, 2011, 80(2): 72-5.

[21] Kara K, Sivrioglu AK, Ozturk E, et al. The role of coronary CT

angiography in diagnosis of patent foramen ovale[J]. Diagn Interv Radiol, 2016, 22(4): 341-6.

[22] Kim YJ, Hur J, Shim CY, et al. Patent foramen ovale: diagnosis with multidetector CT: comparison with transesophageal echocardiography[J]. Radiology, 2009, 250(1): 61-7.

[23] Miki T, Nakagawa K, Ichikawa K, et al. Diagnostic performance of cardiac computed tomography for detecting patent foramen ovale: evaluation using transesophageal echocardiography and catheterization as reference standards[J]. J Cardiovasc Dev Dis, 2023, 10(5): 193.

[24] Rana BS, Shapiro LM, McCarthy KP, et al. Three-dimensional imaging of the atrial septum and patent foramen ovale anatomy: defining the morphological phenotypes of patent foramen ovale[J]. Eur J Echocardiogr, 2010, 11(10): i19-25.

[25] Mas JL, Saver JL, Kasner SE, et al. Association of atrial septal aneurysm and shunt size with stroke recurrence and benefit from patent foramen ovale closure[J]. JAMA Neurol, 2022, 79(11): 1175.

[26] Vizzari G, Pizzino F, Zwicke D, et al. Patent foramen ovale: anatomical complexity and long-tunnel morphology related issues [J]. Am J Cardiovasc Dis, 2021, 11(3): 316-29.

[27] 张玉顺, 蒋世良, 朱鲜阳. 卵圆孔未闭相关卒中预防中国专家指南[J]. 心脏杂志, 2021, 33(1): 1-10.

[28] Saremi F, Channual S, Raney A, et al. Imaging of patent foramen ovale with 64-section multidetector CT[J]. Radiology, 2008, 249 (2): 483-92.

[29] Revel MP, Faivre JB, Letourneau T, et al. Patent foramen ovale: detection with nongated multidetector CT[J]. Radiology, 2008, 249 (1): 338-45.

[30] Cabanes L, Mas JL, Cohen A, et al. Atrial septal aneurysm and patent foramen ovale as risk factors for cryptogenic stroke in patients less than 55 years of age. A study using transesophageal echocardiography[J]. Stroke, 1993, 24(12): 1865-73.

[31] Force M, Massabuau P, Larrue V. Prevalence of atrial septal abnormalities in older patients with cryptogenic ischemic stroke or transient ischemic attack[J]. Clin Neurol Neurosurg, 2008, 110(8): 779-83.

[32] Rigatelli G, Zuin M, Bilato C. Atrial septal aneurysm contribution to the risk of cryptogenic stroke in patients with patent foramen ovale: a brief updated systematic review and meta-analysis[J]. Trends Cardiovasc Med, 2023, 33(6): 329-33.

[33] Shehata A, Nasser A, Mohsen A, et al. Prevalence and characteristics of patent foramen ovale in a sample of Egyptian population: a computed tomography study[J]. Egypt Heart J, 2024, 76(1): 73.

[34] Cho HJ, Jung JI, Kim HW, et al. Intracardiac eustachian valve cyst in an adult detected with other cardiac anomalies: usefulness of multidetector CT in diagnosis[J]. Korean J Radiol, 2012, 13(4): 500.

[35] Salih M, Demirel LC, Kurtay G. Prenatal diagnosis of ostium secundum atrial septal defect by M-mode fetal echocardiography [J]. Gynecol Obstet Invest, 1998, 45(1): 68-70.

[36] 彭明亮, 刘 浩, 程赛明, 等. 冠状动脉CT造影与经胸右心声学造影诊断卵圆孔未闭的对比研究[J]. 心肺血管病杂志, 2022, 41(7): 811-4.

[37] Mas JL, Derumeaux G, Guillon B, et al. Patent foramen ovale closure or anticoagulation *vs*. antiplatelets after stroke[J]. N Engl J Med, 2017, 377(11): 1011-21.

[38] Søndergaard L, Kasner SE, Rhodes JF, et al. Patent foramen ovale closure or antiplatelet therapy for cryptogenic stroke[J]. N Engl J Med, 2017, 377(11): 1033-42.

[39] Saver JL, Carroll JD, Thaler DE, et al. Long-term outcomes of patent foramen ovale closure or medical therapy after stroke[J]. N Engl J Med, 2017, 377(11): 1022-32.

[40] Lee PH, Song JK, Kim JS, et al. Cryptogenic stroke and high-risk patent foramen ovale the DEFENSE-PFO trial[J]. J Am Coll Cardiol, 2018, 71(20): 2335-42.

[41] Nakayama R, Takaya Y, Akagi T, et al. Identification of high-risk patent foramen ovale associated with cryptogenic stroke: development of a scoring system[J]. J Am Soc Echocardiogr, 2019, 32(7): 811-6.

[42] Kumar P, Rusheen J, Tobis JM. A comparison of methods to determine patent foramen ovale size[J]. Catheter Cardiovasc Interv, 2020, 96(6): E621-9.

[43] 刘乙锦, 郑 冲, 耿文磊, 等. 双源CT冠状动脉成像在卵圆孔未闭中的诊断价值[J]. 医学影像学杂志, 2024, 34(7): 31-4.

[44] Mirzayeva L, Yayli N, Budak SN, et al. Quantitative volumetric analysis of the patent foramen ovale tunnel in coronary computed tomography angiography: clinical implications and diagnostic significance[J]. J Comput Assist Tomogr, 2025, 49(6): 920-6.

[45] Wang AY, Rothwell PM, Nelson J, et al. Patent foramen ovale closure in older patients with stroke: patient selection for trial feasibility[J]. Neurology, 2024, 102(10): e209388.

[46] Martín F, Sánchez PL, Doherty E, et al. Percutaneous transcatheter closure of patent foramen ovale in patients with paradoxical embolism[J]. Circulation, 2002, 106(9): 1121-6.

[47] Abaci A, Unlu S, Alsancak Y, et al. Short and long term complications of device closure of atrial septal defect and patent foramen ovale: Meta-analysis of 28, 142 patients from 203 studies [J]. Cathet Cardio Intervent, 2013, 82(7): 1123-38.

[48] Iqbal Z, Gandhi SD, Markan S, et al. Acute pericardial tamponade as a remote complication of a CardioSEAL atrial septal defect closure device[J]. J Cardiothorac Vasc Anesth, 2008, 22(1): 90-1.

[49] Suligoj NC, Rojko M, Suligoj B, et al. Long-term transesophageal echocardiography after patent foramen ovale closure by BioSTAR and Amplatzer patent foramen ovale occluders[J]. Cathet Cardio Intervent, 2020, 95(3): 349-54.

[50] Liguori C, Lassandro G, Ferrandino G, et al. ECG-gated CCTA in the assessment of post-procedural complications[J]. Diagnostics, 2023, 13(15): 2500.

[51] Sabarudin A, Sun ZH, Ng KH. A systematic review of radiation dose associated with different generations of multidetector CT coronary angiography[J]. J Med Imaging Radiat Oncol, 2012, 56(1): 5-17.

[52] Rinkel LA, Bouma BJ, Boekholdt SM, et al. Detection of patent foramen ovale in patients with ischemic stroke on prospective ECG-gated cardiac CT compared to transthoracic echocardiography[J]. J Neurol, 2023, 270(7): 3537-42.

[53] Rønning M, Johansen E, Rusandu A. Photon-counting CT versus energy-integrating detectors for cardiac imaging: a systematic review of evidence from *in vivo* human studies on image quality and radiation dose[J]. BMC Med Imaging, 2025, 25(1): 295.

（编辑：郎 朗）