

Tổng quan

ỨNG DỤNG CT PHỔ TRONG ĐÁNH GIÁ BỆNH LÝ ĐỘNG MẠCH VÀNH TẠI BỆNH VIỆN THỐNG NHẤT TP HỒ CHÍ MINH

Huỳnh Nguyên Thuận^{1*}, Bùi Thị Thanh Tâm¹, Trần Thị Hậu¹, Trần Thanh Phong¹, Trần An Khang¹, Đỗ Võ Công Nguyễn¹

1. Khoa Chẩn đoán hình ảnh, Bệnh viện Thống Nhất, thành phố Hồ Chí Minh

* Tác giả liên hệ: Huỳnh Nguyên Thuận ✉ huynh@thuan.org

TÓM TẮT: Tại Bệnh viện Thống Nhất, thành phố Hồ Chí Minh, hệ thống máy CT phổ đã mang lại những bước tiến đáng kể trong chẩn đoán bệnh lý mạch vành. Các ứng dụng xử lý hậu kỳ của CT phổ được sử dụng bao gồm: hình ảnh đơn sắc ảo (MonoE), số hiệu nguyên tử hiệu dụng (Z-effective), bản đồ phân bố I-ốt, hình ảnh không tiêm cản quang ảo (VNC), hình ảnh tăng cường cấu trúc ngấm thuốc. Các loại hình ảnh đa dạng thu được từ kỹ thuật CT phổ mang lại nhiều lợi ích như giảm liều thuốc cản quang cho bệnh nhân, giảm xáo ảnh năng cao chất lượng hình ảnh từ đó giúp đánh giá chính xác hơn mức độ hẹp mạch vành. Bản đồ I-ốt còn giúp đánh giá tình trạng tưới máu cơ tim, cung cấp thông tin toàn diện và chính xác hơn về bệnh lý mạch vành. Việc sử dụng VNC để tính điểm vôi hóa thay thế cho phim không thuốc thật (TNC) đang trong giai đoạn nghiên cứu tại Bệnh viện Thống Nhất với những kết quả ban đầu khả quan, hứa hẹn sẽ thay thế TNC trong đánh giá CS, từ đó giảm liều tia cho bệnh nhân. Bài viết này xin trình bày các ứng dụng của CT phổ và các ca lâm sàng thực tế tại BV Thống Nhất - TP Hồ Chí Minh nhằm làm rõ ứng dụng của CT phổ trong đánh giá bệnh lý mạch vành.

Từ khóa: CT động mạch vành, CT phổ, hình ảnh không thuốc ảo

THE APPLICATION OF SPECTRAL CT IN THE EVALUATION OF CORONARY ARTERY DISEASE AT THONG NHAT HOSPITAL - HO CHI MINH CITY

ABSTRACT: At Thong Nhat Hospital, Ho Chi Minh City, the spectral CT system has brought significant advancements in the diagnosis of coronary artery disease. The post-processing applications of spectral CT that are used include: virtual monoenergetic images (MonoE), effective atomic number (Z-effective), iodine density map, iodine no water, virtual non-contrast images (VNC), and enhanced visualization of contrast-enhancing structures. The diverse types of images obtained from the spectral CT technique bring many benefits such as reducing the contrast media dose for patients and reducing artifacts to improve image quality, thereby helping to more accurately assess the degree of coronary stenosis. Iodine maps also help assess myocardial perfusion status, providing more comprehensive and accurate information about coronary artery disease. The use of VNC to calculate the calcium score as a replacement for true non-contrast (TNC) images is currently in the research phase at Thong Nhat Hospital with promising initial results, holding the promise of replacing TNC in CS assessment, thereby reducing the radiation dose for patients. This article aims to present the applications of spectral CT and actual clinical cases at Thong Nhat Hospital - Ho Chi Minh City to clarify the application of spectral CT in the evaluation of coronary artery disease.

Keywords: Coronary CT angiography, spectral CT, virtual non-contrast images .

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

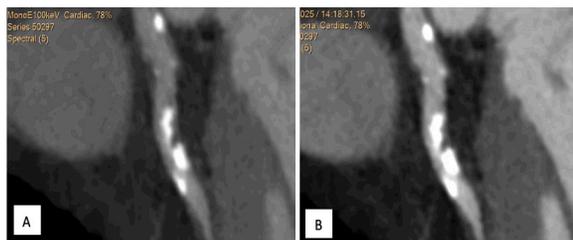
Bệnh lý động mạch vành (BĐMV) vẫn là nguyên nhân hàng đầu gây tử vong trên toàn thế giới, đòi hỏi các phương pháp chẩn đoán không xâm lấn, chính xác và hiệu quả. Trong bối cảnh đó, chụp CT động mạch vành có cản quang (CCTA) đã nổi lên như một công cụ chẩn đoán hàng đầu, được công nhận rộng rãi trong các hướng dẫn lâm sàng để loại trừ BĐMV ở những bệnh nhân có nguy cơ tử thấp đến trung bình, nhờ vào độ nhạy và giá trị tiên đoán âm tính rất cao. Sự ra đời của CT phổ (Spectral CT) đã mang đến một cuộc cách mạng, bằng cách thu thập dữ liệu ở nhiều mức năng lượng tia X khác nhau trong cùng một lần quét, CT phổ có khả năng phân biệt các vật chất dựa trên đặc tính suy giảm năng lượng riêng biệt của chúng [1]. Điều này đã mở ra một kỷ nguyên mới, nơi một lần chụp CT duy nhất không chỉ cung cấp hình ảnh giải phẫu mạch vành với độ phân giải cao mà còn cho phép phân tích thành phần vật chất và đánh giá chức năng tưới máu. Khả năng tích hợp này hứa hẹn một phương pháp chẩn đoán toàn diện, có khả năng thay đổi mô hình chẩn đoán BĐMV từ việc "phát hiện hẹp" sang "đánh giá nguy cơ và ý nghĩa của tổn thương".

Hệ thống máy CT được sử dụng để chụp mạch vành ở bệnh viện Thống Nhất là Philips Spectral CT 7500. Đây là hệ thống CT phổ với một đầu đèn phát tia và sử dụng đầu thu hai lớp (dual-layer detector) vì vậy hệ thống này có thể thu nhận đồng thời hai mức năng lượng trên cùng một điểm ảnh và theo thời gian thực chỉ với một lần chụp. Hệ thống Philips Spectral CT 7500 nổi bật với khả năng tái tạo hình ảnh thời gian thực và giảm liều tia xuống 20-30% so với CT thông thường. Mỗi ảnh thu được đều có dữ liệu phổ và có thể tái tạo các hình ảnh đơn năng lượng ảo MonoE, hình không thuốc ảo VNC, bản đồ I-ốt cho mọi lát cắt. Bài viết này xin trình bày protocol khảo sát động mạch vành với hệ thống máy CT phổ, kỹ thuật xử lý hậu kỳ và các ca lâm sàng thực tế tại Bệnh viện Thống Nhất, thành phố Hồ Chí nhằm làm rõ ứng dụng của CT phổ trong đánh giá bệnh lý mạch vành.

2. CÁC ỨNG DỤNG HÌNH ẢNH CT PHỔ TRONG ĐÁNH GIÁ BỆNH LÝ MẠCH VÀNH

2.1. Hình ảnh đơn năng lượng ảo

Hình ảnh đơn năng lượng ảo (Mono energetic image hay MonoE) là kỹ thuật tạo hình ảnh dựa trên phổ năng lượng đơn, mô phỏng như chụp CT bằng các nguồn tia X có mức năng lượng xác định, điều này giúp tối ưu hóa độ tương phản trên hình ảnh hoặc giảm các hiện tượng ảnh giả do vôi hóa hoặc stent gây ra. MonoE ở mức năng lượng thấp (40-70keV) giúp tăng độ tương phản giữa thuốc cản quang và thành mạch, từ đó hiển thị rõ hơn lòng động mạch vành. CNR (Contrast-to-Noise Ratio) là tỷ lệ tương phản trên nhiễu, phản ánh khả năng phân biệt cấu trúc; SNR (Signal-to-Noise Ratio) là tỷ lệ tín hiệu trên nhiễu, phản ánh chất lượng hình ảnh. Các nghiên cứu cho thấy hình ảnh MonoE có chỉ số CNR và SNR cao hơn so với hình ảnh cắt lớp thông thường và hình ảnh MonoE ở mức năng lượng 40, 50 keV cho chất lượng hình ảnh cao hơn so với các kỹ thuật thông thường [2, 3]. MonoE ở mức năng lượng cao (100-120 keV) giúp giảm hiện tượng khuếch đại (blooming artifact) do vôi hóa hoặc vật liệu stent, giúp giảm sự đánh giá quá mức mức độ hẹp gây ra bởi mảng xơ vữa vôi hóa hay sự tái hẹp trong lòng stent. Đã có nghiên cứu cho thấy, trên nhóm bệnh nhân vôi hóa nặng, hình ảnh MonoE ở mức năng lượng 100keV cho hiệu suất chẩn đoán tối ưu hơn trong đánh giá hẹp động mạch vành [4].



Hình 1. Hình (A) cho thấy lòng mạch rõ nét hơn ở MonoE 100 keV so với hình thông thường (B), giảm hiện tượng ảnh giả do vôi hóa. Nguồn: Bệnh viện Thống Nhất

2.2. Số hiệu Nguyên tử Hiệu dụng

Số hiệu nguyên tử hiệu dụng (Z-effective hay Zeff) là một tham số định lượng khác được rút ra từ dữ liệu CT phổ. Nó đại diện cho số hiệu nguyên tử trung bình của vật chất trong một voxel. Các thành phần sinh học khác nhau có cấu tạo nguyên tố riêng biệt: lipid (chủ yếu là carbon và hydro) có Zeff thấp, mô xơ (giàu oxy và nitơ hơn) có Zeff trung bình, và canxi có Zeff cao [5]. Do đó, bản đồ Zeff có thể phân biệt các thành phần này một cách hiệu quả hơn so với thang đo Hounsfield, vốn chỉ phản ánh mật độ vật chất.

Mặc dù các nghiên cứu xác thực trực tiếp trên động mạch vành vẫn đang được tiến hành, các nghiên cứu trên động mạch cảnh đã cho thấy Zeff có thể phân biệt lõi hoại tử giàu lipid (LRNC) với mô xơ với độ chính xác cao khi so sánh với kết quả mô bệnh học. Các nghiên cứu cũng chỉ ra rằng các mảng xơ vữa gây triệu chứng (thường giàu lipid và dễ bị tổn thương hơn) có giá trị Zeff thấp hơn đáng kể so với các mảng xơ vữa không gây triệu chứng (thường ổn định hơn, giàu thành phần xơ và vôi hóa) [6]. Tại Bệnh viện Thống Nhất, bản đồ Zeff được overlay lên hình ảnh CCTA để bác sĩ xác định các mảng xơ vữa không vôi hóa có nguy cơ cao và xác định vùng tổn thương cơ tim vốn có thể bị đánh giá thấp trên hình ảnh CCTA thông thường, bản đồ, từ đó cải thiện việc phân tầng nguy cơ cho bệnh nhân [Hình 4]

2.3. Bản đồ phân bố I-ốt

Bản đồ phân bố i-ốt (Iodine no Water) và bản đồ mật độ i-ốt (Iodine Density Overlay) là một trong những ứng dụng mạnh mẽ nhất của CT phổ. Kỹ thuật này dựa trên quá trình phân giải vật liệu, trong đó tín hiệu của i-ốt được tách biệt khỏi tín hiệu của các vật liệu nền như nước (đại diện cho mô mềm). Kết quả là một hình ảnh mới, trong đó cường độ tín hiệu tại mỗi voxel tỷ lệ thuận với nồng độ i-ốt tuyệt đối (đơn vị mg/mL). Kỹ thuật này nhấn mạnh việc loại bỏ tín hiệu của nước để chỉ hiển thị sự phân bố của i-ốt, giúp tăng cường độ tương phản của các cấu trúc ngấm thuốc. Điều này cho phép định lượng khách quan sự ngấm thuốc, vượt qua những hạn chế của đơn vị Hounsfield truyền thống.

Ngoài việc có thể sử dụng xác định mức độ hẹp lòng mạch như CCTA, bản đồ phân bố i-ốt đã chứng tỏ vai trò tiên lượng quan trọng trong việc đánh giá tái hẹp trong stent. Việc đánh giá tái hẹp trong stent bằng CCTA thông thường là một thách thức lớn do xảo ảnh khuếch đại từ các thanh đỡ kim loại của stent [Hình 2], làm cho lòng stent có vẻ hẹp hơn thực tế và che khuất các tổn thương tái hẹp [7]. Nghiên cứu phantom Lihong Chen và cộng sự sử dụng máy CT phổ đánh giá stent động mạch vành cho thấy bản đồ i-ốt cho chỉ số xảo ảnh khuếch đại (BAI) và chênh lệch đường kính trong (IDD) thấp nhất, nghĩa là nó mô tả kích thước và cấu trúc stent chính xác hơn [7]. Một báo cáo trường hợp lâm sàng năm 2023 cũng chứng minh rằng hình ảnh mật độ i-ốt cho phép đánh giá một stent có đường kính nhỏ (2,25 mm) bị tái hẹp, trong khi hình ảnh CT thông thường gặp nhiều khó khăn [8]. Điều này cho thấy bản đồ i-ốt là một công cụ bổ trợ có giá trị, đặc biệt trong việc đánh giá chính xác cấu trúc stent và có thể giúp xác định vị trí tái hẹp stent, ngay cả ở các stent có kích thước nhỏ vốn là một thách thức lớn [Hình 3].



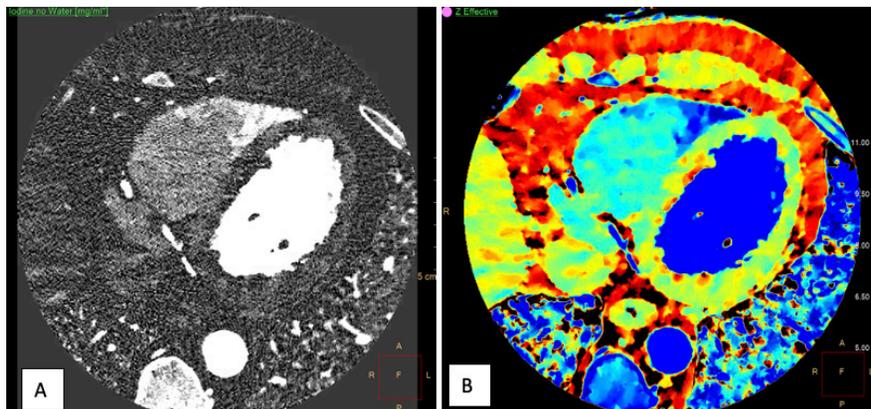
Hình 2. Ảnh động mạch liên thất trước trên conventional sau khi tái tạo, xảo ảnh khuếch đại stent hạn chế khảo sát trong stent. Nguồn: Bệnh viện Thống Nhất

Bên cạnh đó, bản đồ phân bố i-ốt đã chứng tỏ vai trò tiên lượng quan trọng trong việc can thiệp các tổn thương tắc nghẽn mãn tính, hỗ trợ cho việc xác định tổn thương trước khi can thiệp CTO qua da. Bằng cách đo Nồng độ I-ốt Mạch vành tại đầu gần của tổn thương, CT phổ có thể gián tiếp đánh giá sự tồn tại của các vi kênh bên trong tổn thương, thứ ảnh hưởng đến khả năng đưa dây dẫn thủ thuật qua đoạn tắc. Một nghiên cứu quan trọng đã phát hiện ra rằng mức nồng độ I-ốt thấp ($\leq 2,5$ mg/mL) là một yếu tố dự báo độc lập và rất mạnh mẽ cho sự thất bại của can thiệp PCI [9].



Hình 3. Ảnh động mạch liên thất trước trên bản đồ i-ốt cho thấy vùng giảm nồng độ I-ốt trong stent. Nguồn: Bệnh viện Thống Nhất

Cuối cùng, bản đồ i-ốt trong tim mạch giúp đánh giá tưới máu cơ tim. Nồng độ i-ốt trong cơ tim phản ánh trực tiếp lưu lượng máu đến vùng đó [10]. Một vùng cơ tim bị thiếu máu do hẹp động mạch vành có ý nghĩa huyết động sẽ có nồng độ i-ốt thấp hơn, biểu hiện dưới dạng một "khuyết tưới máu" trên bản đồ i-ốt [Hình 4]. Nhiều nghiên cứu đã xác nhận giá trị của phương pháp này, cho thấy sự tương quan tốt với các tiêu chuẩn vàng như xạ hình tưới máu cơ tim SPECT, cộng hưởng từ (CMR) và dự trữ lưu lượng vành (FFR) [11]. Một nghiên cứu đã chỉ ra rằng nồng độ i-ốt 2,1 mg/mL là ngưỡng tối ưu để phân biệt giữa cơ tim bình thường và bệnh lý (thiếu máu hoặc nhồi máu), với độ nhạy 75%, độ đặc hiệu 73,6% và diện tích dưới đường cong (AUC) là 0,806 khi so sánh với CMR [12]. Tuy nhiên để thể hiện hình ảnh cơ tim thiếu máu một cách trực quan, chúng ta có thể sử dụng Z-effective để làm rõ màu bị tổn thương. Khả năng cung cấp thông tin chức năng và giải phẫu trong cùng một lần quét giúp tăng đáng kể độ đặc hiệu chẩn đoán, hỗ trợ các bác sĩ tim mạch can thiệp lập kế hoạch chiến lược tốt hơn và tiên lượng khả năng thành công của thủ thuật.



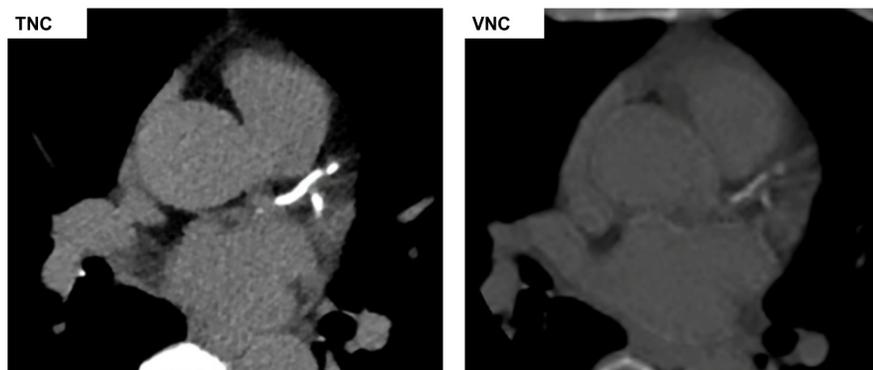
Hình 4. Ảnh vùng giảm tưới máu cơ tim vách liên thất trước trên bản đồ i-ốt (A) và Zeff ở bệnh nhân nhồi máu động mạch liên thất trước (B). Nguồn: Bệnh viện Thống Nhất

2.4. Hình ảnh không thuốc ảo

Trong lâm sàng, đánh giá vôi hóa động mạch vành thường được thực hiện thông qua chuỗi chụp CT tim không tiêm thuốc cản quang (True non-contrast – TNC) có ECG-gated, nhằm tính điểm vôi hóa theo phương pháp Agatston. Tuy nhiên, quy trình này đòi hỏi một chuỗi chụp riêng biệt trước khi thực hiện CT mạch vành có tiêm thuốc, từ

đó làm tăng tổng liều phơi nhiễm tia X và kéo dài thời gian chụp. Với sự phát triển của chụp cắt lớp vi tính phổ, kỹ thuật hình ảnh không thuốc ảo (Virtual Non-Contrast hay VNC) đã được ứng dụng để tạo ra hình ảnh không cản quang từ chuỗi chụp có tiêm thuốc cản quang, bằng cách loại bỏ vật chất cản quang (như I-ốt) dựa trên các khác biệt về tính chất hấp thụ năng lượng. Điều này mở ra cơ hội thay thế chuỗi TNC bằng VNC, vừa giúp tiết kiệm liều phóng xạ, vừa giảm thời gian và chi phí chụp cho người bệnh.

Nhiều nghiên cứu gần đây đã đánh giá khả năng sử dụng ảnh VNC để tính điểm vôi hóa và ghi nhận mối tương quan cao giữa điểm vôi hóa động mạch vành trên ảnh VNC và ảnh TNC truyền thống. Yamak và cộng sự phát triển mô hình hồi quy để xác định ngưỡng tương đương với 130 HU trên ảnh TNC và áp dụng cho ảnh VNC, cho kết quả hệ số tương quan rất cao ($r = 0,98$) với điểm vôi hóa thật [13]. Schwarz và cộng sự nghiên cứu trên 36 bệnh nhân và cho thấy thể tích vôi hóa trên VNC có tương quan chặt với TNC ($r = 0,94-0,95$). Dù giá trị VNC trên CT phổ có xu hướng thấp hơn giá trị từ TNC, mô hình hiệu chỉnh vẫn giúp tái lập chính xác điểm số Agatston với độ tin cậy cao (ICC = 0,91) [14]. Yamada và cộng sự cũng xác nhận tính chính xác của VNC trong phân tầng nguy cơ xơ vữa mạch vành, đặc biệt khi áp dụng mô hình hiệu chỉnh hoặc nhân hệ số cụ thể (ví dụ: Nadjiri và cộng sự đề xuất nhân hệ số 2,3 cho giá trị CTCACS từ VNC) [15, 16]. Một ưu điểm nổi bật là giảm đáng kể liều tia khi loại bỏ chuỗi chụp TNC riêng biệt. Các nghiên cứu ghi nhận mức giảm liều từ 5,4 mSv xuống còn khoảng 1,7 – 4,3 mSv, tùy loại máy và quy trình chụp [15]. Tuy nhiên, các nghiên cứu cũng lưu ý rằng kết quả từ ảnh VNC phụ thuộc vào nền tảng máy, thuật toán khử iod và loại vật liệu phân tách năng lượng (Dual-source dùng hai nguồn tia X, rapid kVp switching thay đổi điện áp nhanh, còn spectral detector phân tách năng lượng bằng đầu thu), nên cần chuẩn hóa hệ số hiệu chỉnh theo từng hãng máy và hệ thống. Ngoài ra, các giả ảnh (artifact) do vôi hóa hoặc chuyển động có thể ảnh hưởng đến độ chính xác khi so với ảnh TNC thật. Mặc dù vậy, hình ảnh VNC vẫn cho thấy tiềm năng lớn trong việc thay thế chuỗi TNC truyền thống trong đánh giá vôi hóa động mạch vành, nhờ khả năng giảm liều phóng xạ, tiết kiệm thời gian và chi phí. Tuy nhiên, để ứng dụng VNC một cách rộng rãi và đáng tin cậy trong thực hành lâm sàng, cần các nghiên cứu đa trung tâm, trên nhiều hệ thống máy khác nhau, nhằm chuẩn hóa quy trình tạo ảnh và hiệu chỉnh điểm CTCACS cho phù hợp với từng nền tảng kỹ thuật. Đây cũng chính là hướng nghiên cứu đang được triển khai thực hiện tại bệnh viện Thống Nhất.



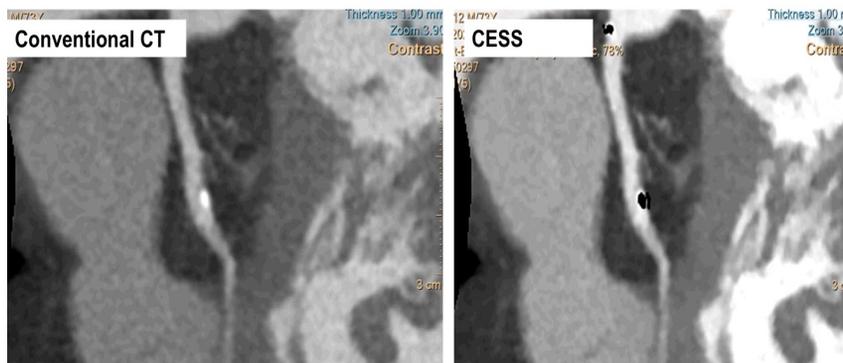
Hình 5. So sánh TNC và VNC trong khảo sát chỉ số Canxi Score

2.5. Ảnh tăng cường cấu trúc ngấm thuốc

Ảnh tăng cường cấu trúc ngấm thuốc (Contrast enhances structures - CES) trong đánh giá bệnh lý mạch vành là một phương pháp xử lý hình ảnh tiên tiến của CT phổ. Trong bối cảnh bệnh mạch vành, CES đặc biệt hữu ích nhờ khả năng làm nổi bật các mô tổ chức có hấp thu thuốc cản quang – chẳng hạn như lòng mạch chứa I-ốt – đồng thời loại bỏ các tín hiệu giả từ các thành phần không bắt cản quang như vôi hóa hay mô xơ.

Hình CES sử dụng thuật toán chuyên biệt để tách biệt và cô lập tín hiệu hấp thu I-ốt, cho phép tái tạo hình ảnh rõ nét của lòng động mạch vành. Nhờ đó, kỹ thuật này giúp phân biệt rõ ràng giữa mảng xơ vữa có vôi hóa, mảng mềm có tăng sinh mạch và

thành mạch lành, điều này vốn rất khó thực hiện với CT thường do hiện tượng ảnh giả (blooming) từ vôi hóa gây che khuất lòng mạch. Hình ảnh CES không chỉ cải thiện độ tương phản giữa lòng mạch và tổn thương, mà còn hỗ trợ đánh giá mức độ hẹp mạch, bản chất mảng xơ vữa và hiệu quả của can thiệp mạch vành, từ đó cung cấp thông tin chẩn đoán và theo dõi điều trị có giá trị trong lâm sàng.



Hình 6. Hình B cho thấy mảng vôi hóa được phân biệt rõ với lòng mạch trên CES so với hình CT conventional (A)

3. KẾT LUẬN

CT phổ đã thực sự chuyển đổi CCTA từ một công cụ đánh giá giải phẫu đơn thuần thành một phương pháp chẩn đoán hình ảnh đa tham số, tích hợp thông tin về hình thái, chức năng và thành phần vật chất. Các kỹ thuật tiên tiến như hình ảnh đơn sắc ảo, số hiệu nguyên tử hiệu dụng, bản đồ phân bố i-ốt, hình ảnh không tiêm cản quang ảo, đang cung cấp những thông tin sinh lý và bệnh học quan trọng chưa từng có, giúp cải thiện đáng kể độ chính xác chẩn đoán, phân tầng nguy cơ và cá thể hóa chiến lược điều trị cho bệnh nhân mắc bệnh lý động mạch vành.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] D'Angelo T, Lanzafame LR, Micari A, Blandino A, Yel I, Koch V, et al. Improved coronary artery visualization using virtual monoenergetic imaging from dual-layer spectral detector CT angiography. *Diagnostics*. 2023;13(16):2675.
- [2] Yi Y, Zhao X-M, Wu R-Z, Wang Y, Vembar M, Jin Z-Y, et al. Low dose and low contrast medium coronary CT angiography using dual-layer spectral detector CT low keV versus low kVp. *International journal*. 2019;60(3):608–17.
- [3] D'Angelo T, Martin S, Micari A, Booz C, Steyer A, Blandino A, et al. Coronary angiography using spectral detector dual-energy CT: is it the time to assess myocardial first-pass perfusion? *Eur Radiol Exp*. 2022;6(1):60. Epub 20221208. doi: 10.1186/s41747-022-00313-w. PubMed PMID: 36480065; PubMed Central PMCID: PMC9732170.
- [4] Xu C, Yi Y, Han Y, Xie H, Lu X, Vembar M, et al. Incremental improvement of diagnostic performance of coronary CT angiography for the assessment of coronary stenosis in the presence of calcium using a dual-layer spectral detector CT: validation by invasive coronary angiography. *The International Journal of Cardiovascular Imaging*. 2021;37(8):2561–72.
- [5] Greffier J, Villani N, Defez D, Dabli D, Si-Mohamed S. Spectral CT imaging: Technical principles of dual-energy CT and multi-energy photon-counting CT. *Diagnostic and Interventional Imaging*. 2023;104(4):167–77. doi: <https://doi.org/10.1016/j.diii.2022.11.003>.
- [6] Zhang J, Li S, Wu L, Wang H, Wang C, Zhou Y, et al. Application of Dual-Layer Spectral-Detector Computed Tomography Angiography in Identifying Symptomatic Carotid Atherosclerosis: A Prospective Observational Study. *Journal of the American Heart Association*. 2024;13(6):e032665. doi: [doi:10.1161/JAHA.123.032665](https://doi.org/10.1161/JAHA.123.032665).
- [7] Chen L, Pan N, Hu B, Li Y, Dong S, Zhou Y, et al. Monoenergetic reconstructions and iodine density maps for visualization of coronary artery stents using 8-cm dual-layer detector spectral

- computed tomography: an in vitro phantom study. *Quant Imaging Med Surg.* 2024;14(10):7671–83. Epub 20240924. doi: 10.21037/qims-24-786. PubMed PMID: 39429615; PubMed Central PMCID: PMC11485354.
- [8] Mochizuki J, Matsumi H, Hata Y. Assessment of In-Stent Restenosis Using Iodine Density Imaging With Spectral Cardiac Computed Tomography. *Circulation Journal.* 2023;87(10):1406. doi: 10.1253/circj.CJ-23-0385.
- [9] Lee JY, Oh Y-W, Lim D-S, Yu CW, Park JH, Joo HJ, et al. Relationship between Coronary Iodine Concentration Determined Using Spectral CT and the Outcome of Percutaneous Coronary Intervention in Patients with Chronic Total Occlusion. *Radiology: Cardiothoracic Imaging.* 2020;2(4):e190203. doi: 10.1148/ryct.2020190203. PubMed PMID: 33778600.
- [10] Prasad Reddy KV, Singhal M, Vijayvergiya R, Sood A, Khandelwal N. Role of DECT in coronary artery disease: a comparative study with ICA and SPECT. *Diagn Interv Radiol.* 2020;26(5):420–8. doi: 10.5152/dir.2020.18569. PubMed PMID: 32755875; PubMed Central PMCID: PMC7490025.
- [11] Vliegenthart R, Pelgrim GJ, Ebersberger U, Rowe GW, Oudkerk M, Schoepf UJ. Dual-Energy CT of the Heart. *American Journal of Roentgenology.* 2012;199(5_supplement):S54–S63. doi: 10.2214/ajr.12.9208. PubMed PMID: 23097168.
- [12] Delgado Sánchez-Gracián C, Oca Pernas R, Trinidad López C, Santos Armentia E, Vaamonde Liste A, Vázquez Caamaño M, et al. Quantitative myocardial perfusion with stress dual-energy CT: iodine concentration differences between normal and ischemic or necrotic myocardium. Initial experience. *European Radiology.* 2016;26(9):3199–207. doi: 10.1007/s00330-015-4128-y.
- [13] Yamak D, Pavlicek W, Boltz T, Panse PM, Akay M. Coronary calcium quantification using contrast-enhanced dual-energy computed tomography scans. *Journal of applied clinical medical physics.* 2013;14(3):203–14.
- [14] Schwarz F, Nance Jr JW, Ruzsics B, Bastarrika G, Sterzik A, Schoepf UJ. Quantification of coronary artery calcium on the basis of dual-energy coronary CT angiography. *Radiology.* 2012;264(3):700–7.
- [15] Yamada Y, Jinzaki M, Okamura T, Yamada M, Tanami Y, Abe T, et al. Feasibility of coronary artery calcium scoring on virtual unenhanced images derived from single-source fast kVp-switching dual-energy coronary CT angiography. *Journal of cardiovascular computed tomography.* 2014;8(5):391–400.
- [16] Nadjiri J, Kaissis G, Meurer F, Weis F, Laugwitz K-L, Straeter AS, et al. Accuracy of calcium scoring calculated from contrast-enhanced coronary computed tomography angiography using a dual-layer spectral CT: a comparison of calcium scoring from real and virtual non-contrast data. *PLoS One.* 2018;13(12):e0208588.