



doi:10.7659/j.issn.1005-6947.250139

http://dx.doi.org/10.7659/j.issn.1005-6947.250139

China Journal of General Surgery, 2025, 34(6):1262-1274.

· 文献综述 ·

以二氧化碳为造影剂的血管造影技术的发展与应用

何楠¹, 刘奕玮², 李青青², 唐小斌¹, 王盛¹, 陈忠¹

(1.首都医科大学附属北京安贞医院 血管外科, 北京 100029; 2.北京阿迈特医疗器械有限公司, 北京 102629)

摘要

二氧化碳(CO₂)作为一种无色、无味、低密度、无肾毒性与过敏反应的阴性造影剂,近年来在血管造影领域的应用日益广泛,尤其适用于碘过敏或肾功能不全患者。CO₂造影联合数字减影血管造影技术已在多个动静脉部位如腹主动脉、肾动脉、髂动脉、下肢动脉、下腔静脉等取得良好图像质量,并在外周动脉疾病、透析通路评估、经颈内静脉肝内门体分流术等临床场景中显示出安全、有效的优势。本文系统梳理了CO₂造影的国内外研究进展,概述其物理化学特性、注射剂量与参数、造影适应证及图像表现,比较了其碘造影剂在图像质量上的异同,总结了常见并发症类型、发生机制及防控措施。尽管CO₂造影图像质量略逊于碘剂,仍可满足大多数诊疗需求,且并发症整体发生率低,主要为轻度一过性不适。随着自动化注射系统与数字方差血管成像等技术的发展,CO₂造影图像质量将持续改善,应用范围有望进一步扩大。未来亟须加强多中心临床研究与标准化操作规范的建设,以推动该技术的广泛推广与规范应用。

关键词

血管造影术; 造影剂; 二氧化碳; 综述

中图分类号: R654.3

Development and application of angiography technology using carbon dioxide as contrast agent

HE Nan¹, LIU Yiwei², LI Qingqing², TANG Xiaobin¹, WANG Sheng¹, CHEN Zhong¹

(1. Department of Vascular Surgery, Beijing Anzhen Hospital, Capital Medical University, Beijing 100029, China; 2. Beijing Advanced Medical Technologies, Ltd. Inc, Beijing 102629, China)

Abstract

Carbon dioxide (CO₂), a colorless, odorless, low-density negative contrast agent with no nephrotoxicity or allergic reactions, has seen increasingly widespread application in the field of vascular imaging in recent years, particularly in patients with iodine allergy or renal insufficiency. When combined with digital subtraction angiography, CO₂ angiography has demonstrated high-quality imaging in various arterial and venous sites such as the abdominal aorta, renal arteries, iliac arteries, lower limb arteries, and inferior vena cava. It has also shown safety and efficacy in clinical scenarios such as peripheral arterial disease, dialysis access evaluation, and transjugular intrahepatic portosystemic shunt procedures. This review systematically summarizes domestic and international research progress on CO₂ angiography, outlines its physicochemical properties, injection dosages and parameters, clinical indications, and

收稿日期: 2025-03-13; 修订日期: 2025-06-10。

作者简介: 何楠, 首都医科大学附属北京安贞医院副主任医师, 主要从事静脉外科方面的研究。

通信作者: 陈忠, Email: chenzhong8658@vip.sina.com

imaging characteristics, and compares its image quality with that of iodine-based contrast agents. Common complications, their mechanisms, and preventive measures are also discussed. Although the image quality of CO₂ is slightly inferior to that of iodine agents, it remains sufficient for most diagnostic and therapeutic needs, with a low overall incidence of mainly mild and transient adverse effects. With the development of automated injection systems and digital variance angiography technology, CO₂ imaging quality is expected to continue improving, and its application scope is likely to expand further. Future efforts should focus on strengthening multicenter clinical research and establishing standardized operational protocols to promote the broader adoption and regulated use of this technology.

Key words

Angiography; Contrast Media; Carbon Dioxide; Review

CLC number: R654.3

在医学应用中,对比剂(造影剂)是为了增强医学影像的观察效果而注入人体组织或器官中的化学制品。按照原理可将对比剂分为阳性对比剂和阴性对比剂两种。阳性对比剂可以增加对X射线的吸收,如碘基或钡基对比剂。阴性对比剂可以减少X射线的吸收,如空气、二氧化碳(CO₂)。

CO₂是一种无色无味的可压缩气体,比氧气的溶解率高20倍,比液体对比剂的黏度低400倍。CO₂在血液中2~3 min即可完全溶解吸收,并通过肺部快速排出,不容易形成气体栓塞。理论上CO₂造影剂的使用没有最大剂量限制。

1 国外研究概况

CO₂作为对比剂的使用至今已有60多年的历史,可以追溯到20世纪60年代,通过静脉注射的CO₂被用作心腔内对比剂以诊断心包积液^[1-2]。此外CO₂还被用作造影剂研究心腔结构。动物实验研究和临床研究都表明CO₂作为对比剂的安全性以及静脉血管对其良好的耐受性^[3]。20世纪80年代,数字减影血管造影技术(digital subtraction angiography, DSA)的出现,大大促进了CO₂血管造影的应用^[4]。作为一种可以安全用于肾功能不全和碘对比剂过敏患者的对比剂,CO₂已经被广泛使用在动脉和静脉血管的各种适应证。其适应证包括但不限于腹主动脉、肠系膜动脉、盆腔动脉、髂动脉、股动脉的血流研究,肾动脉的血流研究与支架植入,内脏动脉的造影与介入手术,肾移植后的动脉狭窄治疗,胃肠道、脾脏、肝脏、肾脏和骨盆出血的检查,动脉瘤修复术,上肢静脉造影,血液透析通路造影,下腔静脉造影,楔形

肝静脉造影,脾门静脉造影等^[5]。

CO₂作为一种成熟的造影剂,在美国已经大量用于临床研究与治疗。在Chaudhuri等^[6]的研究中,他们使用CO₂ mmander系统(AngioAdvancements, 美国)进行了5例外周动脉介入术和5例动脉瘤腔内修复术(endovascular aneurysm repair, EVAR),其中包括1例碘过敏患者和9例肾衰竭患者。证明了CO₂造影可以用于不适用碘造影剂造影病例的介入手术。

在密歇根大学医学院的一项研究中,Cho^[5]系统综述了CO₂的气体性质,优势与劣势,适应证,并发症,CO₂的注射条件,CO₂造影图像的采集,患者准备工作,术中监测及其在各部位血管的应用。该研究总结得出的结论是CO₂造影可以提供诊断和介入术所需的血管信息,并且是对碘造影剂过敏和肾功能不全患者唯一已知的安全造影剂,可以预防造影剂引起的肾病(contrast induced nephropathy, CIN)。在许多需要大量造影剂的诊断性动脉造影和血管介入治疗中,CO₂是优选的造影剂。

CO₂造影剂无肾毒性的性质可以有效减少对肾的损伤。患有外周动脉疾病(peripheral arterial disease, PAD)的患者往往需要紧急治疗以恢复血流。PAD患者通常患有慢性肾病(chronic kidney disease, CKD)、糖尿病和高血压,使用碘造影剂可能诱发CIN,如果使用CO₂造影则可以减少CIN的发生率,防止肾脏损伤^[7]。有较高的CIN发生率的患者通常有以下一种或多种既往疾病:如糖尿病、充血性心力衰竭、慢性肾功能损害、低血压等^[8-11]。已有的肾功能不全或潜在的CKD是CIN发生的最重要风险因素,CKD患者的CIN发生率为14.8%~55.0%^[7,12-14]。而使用CO₂造影剂代替碘剂或

通过CO₂与碘剂的结合使用可以避免或减少碘剂的使用,从而降低CIN的发生率。在Vaccarino等^[15]进行的一项最新研究中探讨了使用CO₂造影是否能减少术中碘造影剂的使用,从而降低患者发生术后肾损伤的风险。该研究筛选了2013年5月—2019年8月接受髂动脉支架植入术的病例,分为使用CO₂造影与碘对比剂(ICM)结合的CO₂组与仅使用ICM造影的ICM组。结果发现CO₂组术中碘暴露低于ICM组,且两组在技术成功率、临床成功率、透视时间和剂量面积乘积方面无差异。

虽然CO₂造影作为对比剂的应用受到了很大重视,但临床医师对CO₂物理化学性能了解不足,对可能发生的气体栓塞的恐惧,对CO₂输送与注射系统不熟悉,以及缺乏易于操作使用的CO₂造影注射器产品,大大限制了该技术的运用^[16]。目前世界上已经出现了多个种类的CO₂造影专用输注器械或设备,大大提高了CO₂造影的安全性及有效性。这些器械或设备主要分为手动装置和有源自动装置两种,手动装置的优势在于便携且价格低廉,有源自动装置的优势在于能够更精确地控制注射参数。

Gupta等^[7]提到了两种CO₂造影剂的输送装置:CO₂ mmander和AngiAssist(AngioAdvancements,美国)。其中AngiAssist输送系统包含2个防回流阀、1个储气注射器、1个输送注射器、1个三通开关,以及输入和输出管路(图1),CO₂ mmander和AngiAssist的连接方式见图2。在人们的认识中,CO₂造影的一些缺点包括:图像质量差、可能发生气体栓塞、CO₂输送系统使用困难、可能发生突爆性气体输送、动脉充盈不足、依赖于技术和经验。而上述的CO₂输送装置克服了其中一些缺点。

Mascoli等^[17]在2016年8月—10月使用一种CO₂注射装置(Angiodroid Srl,意大利)探索了无碘造影剂行EVAR术的可行性。该研究发现通过自动注射装置注射CO₂进行造影可以有效地施行EVAR术,且CO₂相比于碘造影剂更利于观察II型内漏,当然,传统碘造影剂也可观察到常规内漏^[18-19]。

2018年1月—2019年10月,Thomas等^[20]进一步使用Angiodroid Srl装置研究了自动控制式CO₂造影在外周血管介入术中的可行性与安全性(图3)。该研究中所有40例患者耐受了整个CO₂造影过程,没有因疼痛或其他技术问题中断手术,技术成功率100%。这些患者在手术期间和出院前均未发生术中或术后并发症。



图1 预组装的AngiAssist输送系统

Figure 1 Pre-assembled AngiAssist delivery system



图2 组装后的CO₂ mmander与AngiAssist

Figure 2 The assembled CO₂ mmander and AngiAssist



图3 Angiodroid Srl装置

Figure 3 Angiodroid Srl device

2 国内研究概况

20世纪90年代以来,国内开始出现大量地使用CO₂作为对比剂的临床研究与动物实验研究。众多的研究^[21-26]结果表明:CO₂-DSA可以取得满意、可靠的血管造影图像。

董伟华等^[21]使用了医用CO₂钢瓶接减压器和消毒过滤器,调节出气压力为1.3 bar(1 bar=100 kPa),CO₂输送装置为CO₂-Angioset(Optimed)(图4)。每例造影3~5次(CO₂总用量80~120 mL)。



图4 CO₂-Angioset产品
Figure 4 CO₂-Angioset product

黄剑等^[22]使用了手工推注CO₂的方式,在ArtisZeego型(德国Siemens)行CO₂-DSA造影,腹主动脉下段50 mL/次,髂总动脉25~30 mL/次,股动脉15~20 mL/次,2次造影间隔2~3 min。该研究发现对伴有慢性肺病患者应避免急性期造影,且单次剂量应小,间隔时间延长至3~5 min。降低CO₂剂量和推注压力可以在一定程度上降低下肢不适发生率。

李惠民等^[23]使用了专门设计的CO₂气体血管造影装置,该装置由输入段、气体储存袋和输出段以及一组单向阀组成的单向气流封闭系统,输入段与医用纯CO₂气体钢瓶连接,经过反复抽排将装置内的空气完全清除,输出端与输液针连接,经手背静脉或内踝穿刺。由于穿刺针无防回流机构,穿刺时有血液反流入穿刺针。造影由手工控制,用力快速推注CO₂,每次40~60 mL。CO₂造影可以很好地显示肘部以上的引流静脉。

在卢伟等^[24]的研究中,对85例患者在肝动脉(65例)、脾动脉(4例)、肾动脉(4例)、肠系膜上动脉(2例)、直接门静脉(6例)、肝静脉(1例)、腹主及四肢动脉(3例)进行了CO₂造影并同时行碘剂造影对照。CO₂造影采用了程控式和手推式两种方法,程控式的装置为INSPECT 2005型注射器(Vesculab,德国),包括CO₂气罐、调压器、CO₂注射主机、脚踩注射开关和气道连接管。手推式的装置包括CO₂气瓶、导管、注射器和2个三通开关,注射前先进气和排气2~3次。85例中有81例(95%)获得满意图像,这些患者可根据图像行选择性或超选择性插管。手推式注射器很难使CO₂被匀速线性注入,注射过程中CO₂往往先被压缩,然后在超过一定压力时骤然进入血管产生突爆性注

入。程控CO₂注射器可同时控制注射量、压力和时间,使CO₂匀速线性注入,但价格昂贵。另外该研究发现,CO₂因其低黏度可通过碘剂不易通过的较小的动-门(静)脉短路,CO₂-DSA对肿瘤血窦和肝海绵状血管瘤瘤体大小、形态和边缘的显示较常规DSA要好,所以CO₂-DSA在以上病灶中优于常规DSA。

在徐明芝等^[25]的研究中,选取了2020年1月—2020年11月海南省人民医院血液净化中心行血液透析血管通路DSA的40例患者,使用的CO₂气体为99.99%的医用CO₂,双级CO₂减压阀(上海阀门厂YQDS-711型双极二氧化碳减压阀)、高压注射系统(美国Medrad Mark V ProVis高压注射系统)和DSA设备(飞利浦Allura Xper FD10)。从CO₂罐、CO₂减压阀之后的气体输送元件均为一次性无菌物品,依次为输氧管(带阀门,长2 m)、引流袋(管长125 cm)、输液管(带阀门,长165 cm)、三通阀、高压注射器连接管(长120 cm)。在40例患者中,一次性成功有28例(72.5%),提高CO₂剂量、注射速度和曝光速度后40例患者(100%)都可获得比较清晰的图像。

在卢伟等^[26]的研究中,使用CO₂和碘佛醇分别在肝静脉进行造影,采用CO₂浓度为99.99%(北京东方医用气体有限公司),储气罐连接减压阀,采用耐高压管连接储气罐与过滤器、三通管和注射器。抽取60 mL气体以30~40 mL/s的速度在1~2 s内完成手工推注。术中未出现严重并发症。该研究结果表明CO₂楔入法肝静脉造影是安全的,多数患者仅感觉有一过性肝区不适、腹部烧灼、轻度恶心等,无需处理均可自行缓解。为了防止肝静脉或肝包膜破裂导致腹腔出血,注射速度不宜过快,注射压力不宜过高。

在杜海军等^[27]的研究中,采用手动注射的方式探讨了CO₂在不同部位的血管造影中的临床应用效果及其安全性,对52例患者分别行不同部位的血管共70次CO₂-DSA,其中腹主动脉18次,下肢动脉14次,下肢静脉10次,肝动脉10次,肾动脉10次,肠系膜上动脉4次,盆部动脉4次。CO₂为医用纯CO₂气体(99.9%),DSA机为TOSHIBA。该研究中所有动脉造影采用Seldinger技术穿刺股动脉,采用5 F/4 F导管超选择至靶血管后造影。下肢静脉位顺行性造影。造影CO₂用量为每次50 mL,每次间隔3~5 min。总量为200~600 mL。研究结果显

示除了在 10 例肝动脉造影中亚段以下动脉、肿瘤动脉及肿瘤染色不如碘造影好外，其余部位的血管造影均能获得满意的图像，基本满足诊断及治疗的要求。尽管所有患者都出现不同程度的不良反应，40 例（76.9%）为一过性，12 例（23%）对症处理后迅速缓解，全组未出现严重的并发症。该研究认为 CO₂-DSA 可以获得基本满足诊断要求的图像，CO₂ 是一种安全的血管造影剂，CO₂ 可以替代碘造影进行下肢动脉造影。

3 各研究中 CO₂ 造影剂使用剂量与注射参数

CO₂ 造影技术对 CO₂ 剂量与注射参数有着较高

的要求，以满足安全性与有效性的需求。根据文献，CO₂ 造影剂已经广泛用于临床研究中的血管造影，推注剂量根据造影的血管部位不同而随之改变。对于手动注射，一般会手动控制 CO₂ 注射的速率，对于自动程控式注射，一般会控制 CO₂ 的压力和体积。目前的研究中采用的剂量一般为 20~50 mL，少数较粗的血管需要用到 60~80 mL，手工推注的速率一般为 10~20 mL/s，程控式注射的压力一般控制在 3~5 psi（1 psi=6.895 kPa），少数较粗的血管可以采用 6~7 psi。表 1 中汇总了多项研究中使用的 CO₂ 剂量和注射参数。根据汇总数据，可以看出目前广泛使用的 CO₂ 造影剂注射方式分为手动推注和程控式自动注射，手动推注的方式无法定量控制注射压力与速率。

表 1 多项研究中采用 CO₂ 造影的部位、剂量与注射参数汇总
Table 1 Summary of the sites, doses and injection parameters used for CO₂ imaging in multiple studies

数据来源	部位	CO ₂ 使用剂量	注射压力或速率	注射方式/装置
Cho ^[5] 2015	主动脉	23~45 mL/次	15~30 mL/s	手动推注/文中提到的装置有塑料袋输送系统(AngioDynamics, Queensbury, 美国)和 CO ₂ mmander 与 AngiAssist 装置(AngioAdvancements, 美国)
	股浅	15~20 mL/次	10~20 mL/s	
	肾动脉	20 mL/次	—	
	盆腔动脉	30 mL/次	—	
	髂静脉	30 mL/次	—	
	肾静脉	20 mL/次	—	
	楔形肝静脉	30 mL/次	15 mL/s	
Gupta, 等 ^[7] 2020	主动脉、髂动脉、股动脉、胫腓干、胫骨前后动脉	35~500 mL/例 最大 30 mL/次 (输送注射器体积限制)	—	手动推注/CO ₂ mmander 和 AngiAssist 装置
Thomas, 等 ^[20] 2021	盆腔静脉	40~60 mL/次	350 mmHg(6.8 psi)	Angiodroid SRL (Angiodroid, 意大利)
	膝上动脉	30~60 mL/次	240 mmHg(4.6 psi)	
	膝下动脉	30~60 mL/次	240 mmHg(4.6 psi)	
董伟华, 等 ^[21] 2003	髂动脉	40 mL/次	—	手动推注/CO ₂ Angioset (Optimed, 德国)
	肾动脉	20 mL/次	—	
黄剑, 等 ^[22] 2018	腹主动脉下段	50 mL/次	—	手动推注/未提及注射装置
	髂总动脉	25~30 mL/次		
	股动脉	15~20 mL/次		
卢伟, 等 ^[24] 2000	腹腔动脉	50 mL/次	600 mbar(9 psi)	INSPECT 2005 型注射器 (Vesculab, 德国)
	肝总或肝固有动脉	30 mL/次	500 mbar(7 psi)	
	肾动脉	30 mL/次	500 mbar(7 psi)	
	髂内动脉	30 mL/次	600 mbar(9 psi)	
	股动脉	10 mL/次	500 mbar(7 psi)	
	肝静脉	30 mL/次	400 mbar(6 psi)	
徐明芝, 等 ^[25] 2022	前臂动静脉	5~20 mL/次	2~10 mL/s	Medrad Mark V ProVis 高压注射系统 (SOMA, 美国)
	肘部静脉	5~20 mL/次	2~10 mL/s	
	上臂静脉	10~20 mL/次	5~10 mL/s	
	腋静脉-上腔静脉	40~80 mL/次	20~40 mL/s	
	动脉瘤	10~40 mL/次	5~20 mL/s	

表1 多项研究中采用CO₂造影的部位、剂量与注射参数汇总(续)

Table 1 Summary of the sites, doses and injection parameters used for CO ₂ imaging in multiple studies (continued)				
数据来源	部位	CO ₂ 使用剂量	注射压力或速率	注射方式/装置
卢伟, 等 ^[26] 2019	肝门静脉	60 mL/次	30~40 mL/s	手动推注/自制装置
杜海军, 等 ^[27] 2007	腹主动脉	50 mL/次	—	手动推注/未提及装置
	肝动脉			
	肾动脉			
	肠系膜上动脉			
	盆部动脉			
	下肢动脉			
	下肢静脉			
Ali, 等 ^[28] 2017	腹主动脉/下腔静脉	30~40 mL/次	—	手工推注/文中提及的装置有 CO ₂ mmmander 和带 O 型环的改进的塑料袋系统 (AngioDynamics Queensbury, NY, 美国)
	下肢动脉和主动脉分支如肠系膜和	20~30 mL/次	—	
	肾动脉			
	动脉走行研究	30~50 mL/次	低速率 10 mL/s	
Palena, 等 ^[29] 2019	诊断用	280~510 mL/例	病患血压收缩压 +20 mmHg 150~195 mmHg/ 3~3.8 psi	Angiodroid SRL (Angiodroid, 意大利)
	股骨近端	33~60 mL/次		
	股骨远端	34~66 mL/次		
	膝部与胫骨近端	47~87 mL/次		
	胫骨中远端	47~97 mL/次		
	足外踝	54~98 mL/次		
	足底	64~104 mL/次		

4 CO₂作为造影剂的生物和物理特性

CO₂到目前为止仍然是唯一可供选择的对患者无毒和无体内残留的放射造影剂。它具有许多有益的生物特性和物理特性。

CO₂作为一种造影剂,在生物学上的优势尤为突出。CO₂是一种自然产生的物质,无肾毒性、肝毒性和过敏反应。CO₂在血液中高度溶解,可快速完全地通过血液循环经肺部被排出体外。CO₂在血液中主要以三种形式存在:(1)碳酸(68%),CO₂和水在碳酸酐酶的催化下转化为碳酸。碳酸酐酶在肺中有效地催化碳酸转化为CO₂,从肺泡毛细血管中排出。(2)碳氨基化合物(22%),主要是与CO₂结合的血红蛋白。(3)自由溶解的CO₂(10%)^[6]。

在物理特性方面,CO₂具有高浮力,可优先显示血管上部。该特性对前部起始血管的分支成像通常有利,比如肠系膜上动脉和腹膜上动脉。CO₂相较于碘造影剂具有更低的黏滞性,可以通过微导管或介入性鞘以更高的速度注入,可更好地显示侧支血管。在血管内注射过程中,CO₂置换血液,而不是与其混合,不会进行渐进性稀释,可以较好地显示中央静脉和其他大而高容量的血管结构。CO₂无色无味,无法从视觉上与空气区分

开,因此不正确的应用方法可能会导致空气污染,并出现严重的并发症。因此防止空气混入是对所有CO₂造影剂输注系统的共同要求。

5 CO₂造影与碘造影的图像质量比较

本综述汇总了多篇文献中对CO₂造影效果与碘造影效果的比较。常规血管造影剂在血液中溶解后产生影像,CO₂只有在气相状态才能形成影像,因此CO₂溶解于血液后影像也随之消失。从图像质量的角度,CO₂气体完全充盈血管腔是最理想的状态,而间断的大气泡流动也是有利的^[30]。CO₂在注入血管后的分布形式大致分为:气体柱流、间断柱流、层流和分散气泡流。这些分布形态与注射速度、注射量、注射压力、患者血压、脉搏和造影血管的内径大小有关,在越大直径的血管中,增大CO₂注射速度可以得到更为清晰的图像,当达到柱流时图像的质量即达到最佳,继续增大注射速度不会使图像更加清晰^[31]。因此,CO₂造影的图像质量受到多种因素的影响。有研究^[26-27,32]表明,在特定的应用场景下,CO₂造影图像质量优于碘造影。表2汇总了多项研究中CO₂造影图像质量与碘造影图像质量的比较。

表 2 多项研究中 CO₂ 造影的图像质量与碘造影的图像质量的比较

Table 2 Comparison of image quality between CO₂ contrast and iodine contrast in multiple studies

数据来源	造影部位	两种造影方式的图像质量比较
黄剑, 等 ^[22] 2018	腹主动脉至髂动脉段、股腘动脉段	CO ₂ 造影≈碘造影(接近)
	膝下动脉	CO ₂ 造影<碘造影(略差)
徐明芝, 等 ^[25] 2022	血液透析动静脉通路(前臂动静脉、肘部静脉、上臂静脉、腋静脉-上腔静脉、动脉瘤)	CO ₂ 造影≈碘造影(均满足诊断及治疗需要)
卢伟, 等 ^[26] 2019	肝静脉(门静脉显影)	CO ₂ 造影>碘造影(显著)
杜海军, 等 ^[27] 2007	腹主动脉主干、腹腔干、肠系膜上动脉主干、肾动脉主干及髂内外动脉主干	CO ₂ 造影=碘造影
	腹主动脉主干、腹腔干、肠系膜上动脉主干、肾动脉主干及髂内外动脉小分支	CO ₂ 造影<碘造影
	肝动脉段或亚段动脉	CO ₂ 造影=碘造影
	肝动脉亚段以下分支、肿瘤动脉及肿瘤染色	CO ₂ 造影<碘造影
	肝动脉 AV 或 AP 分流, 肝血管瘤显示病灶数量和大小	CO ₂ 造影=碘造影
	肾动脉主干及一、二级分支	CO ₂ 造影=碘造影
	肠系膜上动脉各段主要分支	CO ₂ 造影=碘造影
	肠系膜上动脉小量出血	CO ₂ 造影>碘造影
	髂内动脉主干及各级分支	CO ₂ 造影=碘造影
	子宫肌瘤	CO ₂ 造影>碘造影
	下肢动脉(髂总-胫、腓动脉)各段主干及主要分支, 下肢血管性病变	CO ₂ 造影=碘造影
	下肢膝关节以上静脉	CO ₂ 造影≈碘造影(接近)
	膝关节以下静脉	CO ₂ 造影<碘造影
Palena, 等 ^[29] 2019	股浅动脉、腘动脉、膝下动脉	CO ₂ 造影=碘造影(无统计学差异)
Megale, 等 ^[32] 2020	主动脉瘤 Ia 型内漏	CO ₂ 造影>碘造影
Fujihara, 等 ^[33] 2015	腹主-髂动脉	CO ₂ 造影=碘造影(22.6%)
		CO ₂ 造影≈碘造影(61.3%)
		CO ₂ 造影<碘造影(16.1%)
		CO ₂ 造影=碘造影(62.9%)
	股浅动脉	CO ₂ 造影≈碘造影(35.5%)
		CO ₂ 造影<碘造影(1.6%)
		CO ₂ 造影=碘造影(31.2%)
		CO ₂ 造影≈碘造影(25.0%)
Kawasaki, 等 ^[34] 2012	髂股动脉	CO ₂ 造影<碘造影(43.7%)
		CO ₂ 造影=碘造影
		CO ₂ 造影=碘造影(82%)
		CO ₂ 造影<碘造影(18%)
Heye, 等 ^[35] 2006	上肢和中央静脉	CO ₂ 造影=碘造影(敏感度 97%, 特异度 85%)
Kariya, 等 ^[36] 2010	透析用动静脉瘘	CO ₂ 造影=碘造影(40%)
		CO ₂ 造影≈碘造影(25.7%)
		CO ₂ 造影<碘造影(34.3%)
Afsharirad, 等 ^[37] 2024	股部、腘部、胫部、足部	

CO₂ 血管造影有一定优势, 由于 CO₂ 气体的密度极低, 适合观察常规造影剂未能显示的动-静脉短路、肿瘤的血窦、严重狭窄血管及侧支等^[26]。在 Kariya 等^[36]报道的案例中, 82% 的病例可以单独使用 CO₂ 做瘘管造影从而进行诊断和治疗, 而在与碘造影结合使用后, CO₂ 可用于所有瘘管造影。综合以上汇总的 CO₂ 与碘造影的图像质量对比, 可见 CO₂ 造影的图像质量虽然总体上稍差于碘造影, 但基本能够满足诊断与治疗需求, 并且 CO₂ 作为造影

剂的使用可以大幅减少传统碘剂的使用总量, 从而降低对肾功能的损伤^[38]。在少数单独使用 CO₂ 造影不能实现治疗目的的情形, 仍需要配合少量碘造影剂进行造影。此外, 人们发现 CO₂ 在显示少量动脉性出血、肿瘤血窦、动静脉畸形(瘘)、狭窄血管及侧支、经颈内静脉肝内门体分流术中经肝实质注射使门静脉显影的造影方面优于碘造影剂^[39]。Sasaki 等^[40]在 2024 年报道了 1 例经动脉 CO₂ 血管造影栓塞术成功治疗严重肝损伤的病例, 该

报道显示 CO₂ 能够探测出 ICM 无法显示的出血。Kakuta 等^[41]的研究显示,通过优化图像采集和后期处理的参数,例如将造影血管倾斜 15° 与使用图像叠加 (image stacking) 技术,CO₂-DSA 获得的图像质量可以得到显著提升^[41]。

6 CO₂造影剂的不良反应、并发症与预防

CO₂ 作为造影剂总体上是安全和有效的,但存在一定的并发症,并发症发生的概率和严重程度往往和以下因素有关:造影时 CO₂ 的剂量、空气混入、血管造影的部位、患者血管疾病的复杂程度、患者的耐受性及操作者的经验和技术等。

避免发生并发症的主要手段之一是控制注射的 CO₂ 剂量和注射间隔。造影时 CO₂ 的剂量过大或使用小剂量连续造影时,由于 CO₂ 不能及时溶解,有可能干扰血液的正常流动,造成组织缺血、缺氧和低血压^[6,28]。另外臂动脉注射 CO₂ 要更严格控制 CO₂ 剂量以避免气体回流至胸主动脉^[28]。

控制 CO₂ 的注射压力是另一个避免并发症发生的主要手段。造影时 CO₂ 的压力过大时会造成局部血管膨胀,有损伤血管壁的风险。另外 CO₂ 输入的压力也和患者的疼痛感相关,压力过大可能导致患者产生不耐受的疼痛^[19]。使用可靠的注射装置能够避免空气混入造成的气体栓塞等并发症。另外,在使用 CO₂ 造影时需要注意导管位置的选择,以避免导管距离病变部位过近,血栓碎屑或斑块脱落导致远端栓塞。杜海军等^[27]表明 CO₂ 造影时造成的组织缺血与患者年龄及耐受性有关。当患者的年龄较大,CO₂ 总剂量大,采用手动注射时,更容易出现并发症。

CO₂ 造影既需要控制气体注射的压力、速度和剂量,还需要患者的配合和精密的 DSA 系统,对术者和患者都有一定的要求^[39]。对术者来说,手动注射往往需要较长的训练周期以获得较好的图像质量,而自动注射装置可以更好地控制注射参数,也更利于术者学习注射技巧。由于手动注射很难控制 CO₂ 的压力,在某些情况下,手动注射可能使血管基础压力上升 1 倍^[42]。因此,稳定可靠的 CO₂ 注射装置对减少并发症的发生可以起到关键作用。

6.1 非严重性并发症及解决措施

典型的由 CO₂ 造影引起的非严重性并发症主要

包括一过性腹痛和腿痛。腹痛的持续时间一般在 2~3 min 左右,并且通常是由于肠系膜动脉中短暂的 CO₂ 滞留造成肠系膜缺血导致,若气体被继续吸收,这些症状便会消失。控制 CO₂ 注射剂量和注射间隔可以减少此类并发症的发生。腿部疼痛或者抽筋可能是由于突爆性输入导致的。注射前排除导管内的液体有助于减少不适感。减少 CO₂ 注射剂量和注射压力或者也可减少疼痛的程度和发生的概率。

6.2 严重/致命性并发症及解决措施

6.2.1 空气混入 空气在血液中的溶解度和吸收速率远低于 CO₂^[43]。根据欧洲药典第十版中的定义,在 20 ℃, 101 kPa 的条件下,每 50 个单位体积的水可以溶解 1 个单位体积的空气,而在同样条件下,每 1 个单位体积的水可以溶解 1 个单位体积的 CO₂。另外,在体温条件下,CO₂ 在血液中的溶解度约是氧气的 20 倍^[44]。因此,空气混入 CO₂ 造影剂可能导致严重的气体栓塞与急性组织缺血。若出现症状并持续存在时,需要采取措施清除血管内的空气。有效的辅助手段包括调整患者的体位、局部推拿按摩、使用导管抽吸、高压氧治疗和肝素注射以防止继发性血栓形成。要防止空气混入,首先要保证 CO₂ 气体的纯度,欧洲药典第十版中对医用级 CO₂ 的规定是体积分数不低于 99.5%。当使用高纯 CO₂ 作为气源且输送系统的气密性足够良好时,仅需保证排空管路中原有的空气即可。在造影前通过多次吸入和排出 CO₂,可以最大程度排除导管内的空气,减少空气混入发生的可能。

6.2.2 气锁(vapor lock) 气锁现象是另一种可能造成严重后果的并发症。气锁^[6]指 CO₂ 气泡被困在血管中,没有被及时溶解吸收,从而对正常血流造成干扰和阻断的现象。气锁可能发生在主动脉瘤体内和肺动脉内,发生的原因包括多次短间隔注射 CO₂ 或单次注射量较大,不可溶于血液的气体(主要是氮气和氧气)与困于血管内的 CO₂ 交换失衡,以及空气混入。为了避免气锁现象的发生,在进行 CO₂ 造影时应根据造影血管部位的不同选择合适的造影剂量,2 次造影的时间间隔应在 1~3 min 内,避免大量 CO₂ 气体在血管内的局部积聚。另外在进行 CO₂ 血管造影时应避免使用氧化亚氮麻醉。

6.2.3 动脉粥样硬化脱落导致的远端栓塞 在 CO₂ 血管造影术中,动脉粥样硬化血管腔内压力的突然升高或突爆性的 CO₂ 注入可能会导致松散附着的

碎片释放到下游的血管床中导致病变。防止出现栓子脱落的方法有以下几种方式^[45]：(1) 确保导管尖端不靠近这些栓塞源可有效防止出现这一并发症。(2) 通过在注射前将导管尖端放置在侧支血管中，使注入的气体回流到主动脉而避免直接冲击栓塞源可有效降低这一并发症的发生。(3) 应避免压缩 CO₂ 气源与造影导管直接相连，可通过减压装置对气体进行减压以保证进入血管的气体压力不

会过高。根据笔者在表 1 中汇总的数据，其中最高的注射压力为 9 psi^[24]，该篇文献中仅有 5.9% 的患者出现腹痛等一过性并发症。CO₂ 造影过程中应密切观察患者状况，注意患者的舒适度，结合造影图像质量选择合适的压力。

6.2.4 并发症出现概率 与 CO₂ 造影相关的不良反应并不常见^[6]。表 3 中汇总了多项研究中发生的 CO₂ 造影并发症和数量占比。

表 3 多项研究中的并发症类型和数量汇总
Table 3 Summary of the types and numbers of complications in multiple studies

数据来源	并发症类型	并发症数量	分析原因
Thomas, 等 ^[20] 2021	无术中或术后并发症	0 例/40 例(0%)	—
黄剑, 等 ^[22] 2018	一过性脉氧下降(99%降至 90%左右), 无特殊不适	2 例/19 例(9.5%)	可能与慢性肺病及 2 次造影间隔时间短有关
	下肢刺痛	1 例/19 例(4.8%)	
徐明芝, 等 ^[25] 2022	一过性肢体末端疼痛	3 例/40 例(7.5%)	考虑 CO ₂ 进入掌深弓, 而尺动脉未能很好供血所致
卢伟, 等 ^[26] 2019	一过性腹痛(A 组)	3 例/20 例(15.0%)	未分析
	一过性腹部发热感(B 组)	2 例/20 例(10.0%)	
Palena, 等 ^[29] 2019	非闭塞性肠系膜缺血, 住院时间延长超过 24 h, 急性肾功能衰竭	0 例/36 例(0%)	—
Fujihara, 等 ^[33] 2015	腿痛	8 例/98 例(8.1%)	未分析(该研究采用手动注射, 注射间隔约 30 s)
	腹痛	6 例/98 例(6.1%)	
	腹泻	1 例/98 例(1.0%)	
	非闭塞性肠系膜缺血	2 例/98 例(2.0%)	
Kawasaki, 等 ^[34] 2012	一过性腿痛	6 例/70 例(8.6%)	未分析
	一过性腹痛	1 例/70 例(1.4%)	
Criado, 等 ^[46] 2012	无 CO ₂ 使用相关的并发症	0 例/114 例(0%)	—
Sueyoshi, 等 ^[47] 2015	无 CO ₂ -DSA 相关的并发症	0 例/40 例(0%)	—
Heye, 等 ^[48] 2010	无术中并发症且所有患者都能很好地耐受 CO ₂ 注射	0 例/116 例(0%)	—

由以上汇总的数据可知，CO₂ 造影的常见并发症为一过性腿部和腹部疼痛，此种并发症属于轻度并发症，无需特殊处理即可自行缓解，出现概率整体较低。稍重的并发症如恶心、呕吐、呼吸困难、心跳加速、血氧降低等出现概率则更低。严重的并发症如肠系膜缺血，发生概率一般低于 5%。以上汇总的数据中没有出现导致严重后果的空气混入、气锁、粥样硬化脱落等。

7 CO₂造影技术的发展前景

近年来，临床医生对 CO₂ 造影剂的接受程度逐

渐增长，特别是 DSA 设备已经开始增加 CO₂ 造影模式，如西门子的 Artis 系列 DSA 设备设有专门的 CO₂ 造影模式（Siemens Evenflow）^[49]。另外数字方差血管造影（DVA）技术的出现，将为 CO₂ 造影的大规模推广提供更多的可能性^[50-51]。与 DSA 不同，DVA 不使用遮盖（mask），而是计算图像序列中的标准差、方差和其他时间衍生参数，因此增强了对比剂流动的信号并减弱了噪声信号的影响，从而提高了图像质量^[50]。Óriás 等^[51]发现下肢 CO₂ 造影联合 DVA 使用得到的图像具有比 CO₂-DSA 图像更高的信噪比和更好的图像质量。Thomas 等^[50]对比了两种 DVA 算法和 DSA 的图像质量，结果显示通过 DVA

获得的图像具有更好的对比度噪声比,且造影图像相比于DSA显著更好。Gyúró等^[49]使用DVA软件(the Kinepict Medical Imaging Tool v3.1; KMIT, Kinepict Health Ltd, 匈牙利)结合Siemens Artis Zee与Angiodroid SRL在对4例患有外周血管疾病与肾功能不全的患者的治疗中使用了DVA技术,结果DVA图像的评分明显高于DSA图像的评分(3.84 ± 0.10 vs. 3.31 ± 0.10 , $P < 0.001$),且评分人员认为超过80%的DVA与DSA图像对比结果显示DVA图像比DSA图像更具有诊断价值并且更利于治疗决策。随着DVA技术的发展和应用,结合CO₂造影剂在人体内无肝肾毒性和无过敏性等优点,未来CO₂有望在临床上成为一种标准的造影剂。

CO₂作为对比剂使用的另一个潜在的发展趋势是扩大适用的血管范围与应用场景。气体状态的CO₂对比剂受浮力影响,难以进入某些特定解剖位置的血管,并且气体置换血液时造成的短时间缺血效应使其不宜用于心脏循环。针对CO₂气体对比剂的这些局限性, Karalko等^[52]提出的CO₂泡沫(foam)对比剂提供了一种新的探索方向。他们通过将CO₂与富含胎牛血清的杜氏改良伊格尔培养基以2:1的比例快速混合来制备CO₂泡沫,将其作为增强超声对比剂向尾静脉与下腔静脉注射,结果在右心房实现了高超声回声,表明该方法能够对小鼠心脏进行成像,并且其较短的存在时间有助于避免组织局部缺血。在另一项研究中, Antonello等^[53]首次成功将CO₂对比剂应用于锥形束计算机断层扫描(CBCT),初步展示了CO₂-CBCT的可行性、安全性和令人满意的图像质量。

8 结 论

CO₂作为造影剂联合DSA使用可以应用于横膈以下的动脉造影与全身静脉造影,其安全性与有效性经过了国内外大量的研究已经得到充分证实。作为一种无肝肾毒性和过敏性的造影剂,CO₂造影剂适用于碘过敏患者与肾功能不全患者,并且患有CKD的患者群体可以通过使用CO₂造影剂减少CIN的发生率。非碘过敏、肾功能不全或患有CKD的正常人群也可以使用CO₂造影以避免或降低碘造影剂对肾造成的损伤。

可以使用CO₂造影的动脉主要包括:腹主动脉、主动脉瘤、肝动脉、肾动脉、肠系膜上动脉、

髂动脉、股动脉、腘动脉、胫腓干、胫骨前后动脉、足底动脉、前臂动脉,静脉主要包括:下腔静脉、髂静脉、肾静脉、肝静脉、门静脉、前臂静脉、上臂静脉、腋静脉-上腔静脉、动静脉瘘。使用CO₂造影剂时的适当剂量一般为20~50 mL,少数较粗的血管需要用到60~80 mL,手工推注的速率一般为10~20 mL/s,程控式注射的压力一般控制在3~5 psi,少数较粗的血管可以采用6~7 psi以保证显影图像质量。

CO₂造影的并发症总体发生概率较低,且在保证使用可靠的输注系统的前提下,大部分并发症为轻度并发症,可以自行缓解,主要包括一过性腿部和腹部疼痛。其他并发症如恶心、呕吐、呼吸困难、心跳加速、血氧降低等中度并发症,以及非阻塞性肠系膜缺血、导致严重后果的气锁、器官缺血等严重并发症出现概率很低。在临床使用中,通过使用有效可靠的输注系统以及对使用者进行适当的培训可以减少并发症的发生从而安全地实现血管造影。目前世界市场上存在的CO₂输注系统主要包括手动装置和程控装置两种。手动装置的造影效果受操作者经验的影响较大,需要较长的学习时间,并且难以控制注射压力。程控式装置可以定量控制注射压力或速率,但是这些装置往往有较大的体积和重量,便携度低。另外这些装置较高的成本使其很难在市场上占据优势地位。因此,一种造价低廉、能够限制注射压力,操作简便的CO₂造影剂输注装置将极大地促进CO₂造影技术的普及应用。

由于CO₂造影的图像质量受到众多因素的影响,在今后的临床实践中,仍需要深入研究不同部位、不同病变的推荐量、最小量、适宜量等因素,统一规范造影时导管口与病变位置的推荐距离以提升CO₂造影的安全性和有效性。CO₂造影技术的进一步应用和推广仍需要通过更多的临床研究 with 可行性研究来探索。

作者贡献声明:何楠根据临床实际需求酝酿并起草文章,构思文章整体框架,查阅文献;刘奕玮、李青青负责查阅筛选文献,补充修改文章细节内容(国外研究);唐小斌负责指导写作,修改文章;王盛负责审核并修改文章;陈忠负责研究指导、论文审阅。

利益冲突:所有作者均声明不存在利益冲突。

参考文献

- [1] Phillips JH, Burch GE, Hellinger R. The use of intracardiac carbon dioxide in the diagnosis of pericardial disease[J]. *Am Heart J*, 1961, 61(6):748-755. doi:10.1016/0002-8703(61)90458-6.
- [2] Scatliff JH, Kummer AJ, Janzen AH. The diagnosis of pericardial effusion with intracardiac carbon dioxide[J]. *Radiology*, 1959, 73: 871-883. doi:10.1148/73.6.871.
- [3] Barrera F, Durant TM, Lynch PR, et al. In vivo visualization of intracardiac structures with gaseous carbon dioxide; cardiovascular-respiratory effects and associated changes in blood chemistry[J]. *Am J Physiol*, 1956, 186(2): 325-334. doi: 10.1152/ajplegacy.1956.186.2.325.
- [4] Hawkins IF. Carbon dioxide digital subtraction arteriography[J]. *AJR Am J Roentgenol*, 1982, 139(1): 19-24. doi: 10.2214/ajr.139.1.19.
- [5] Cho KJ. Carbon dioxide angiography: scientific principles and practice[J]. *Vasc Specialist Int*, 2015, 31(3): 67-80. doi: 10.5758/vsi.2015.31.3.67.
- [6] Chaudhuri A, Dey R. Early experience of CO₂ angiography using the CO₂ mmander system[C]. Manchester: British Society for Interventional Radiology, 2016.
- [7] Gupta A, Dosekun AK, Kumar V. Carbon dioxide-angiography for patients with peripheral arterial disease at risk of contrast-induced nephropathy[J]. *World J Cardiol*, 2020, 12(2): 76-90. doi: 10.4330/wjv.v12.i2.76.
- [8] Rear R, Bell RM, Hausenloy DJ. Contrast-induced nephropathy following angiography and cardiac interventions[J]. *Heart*, 2016, 102(8):638-648. doi:10.1136/heartjnl-2014-306962.
- [9] McCullough PA. Contrast-induced nephropathy: definitions, epidemiology, and implications[J]. *Interv Cardiol Clin*, 2014, 3(3): 357-362. doi:10.1016/j.iccl.2014.03.002.
- [10] Golshahi J, Nasri H, Gharipour M. Contrast-induced nephropathy; A literature review[J]. *J Nephrothol*, 2014, 3(2): 51-56. doi: 10.12860/jnp.2014.12.
- [11] Gruberg L, Mintz GS, Mehran R, et al. The prognostic implications of further renal function deterioration within 48 h of interventional coronary procedures in patients with pre-existent chronic renal insufficiency[J]. *J Am Coll Cardiol*, 2000, 36(5): 1542-1548. doi: 10.1016/s0735-1097(00)00917-7.
- [12] Rihal CS, Textor SC, Grill DE, et al. Incidence and prognostic importance of acute renal failure after percutaneous coronary intervention[J]. *Circulation*, 2002, 105(19): 2259-2264. doi: 10.1161/01.cir.0000016043.87291.33.
- [13] McCullough PA, Wolyn R, Rocher LL, et al. Acute renal failure after coronary intervention: incidence, risk factors, and relationship to mortality[J]. *Am J Med*, 1997, 103(5): 368-375. doi: 10.1016/s0002-9343(97)00150-2.
- [14] Gruberg L, Mehran R, Dangas G, et al. Acute renal failure requiring dialysis after percutaneous coronary interventions[J]. *Cathet Cardio Intervent*, 2001, 52(4): 409-416. doi: 10.1002/ccd.1093.
- [15] Vaccarino R, Karelis A, Singh B, et al. Assessment of carbon dioxide angiography in iliac branched repair[J]. *J Endovasc Ther*, 2024;15266028241289012. doi:10.1177/15266028241289012.
- [16] 李洪, 徐明芝, 白亚飞, 等. 改良 CO₂ 输送与全自动注射系统在血液透析动静脉通路造影的运用研究[J]. *中国血液净化*, 2021, 20(5):347-350. doi:10.3969/j.issn.1671-4091.2021.05.015.
- Li H, Xu MZ, Bai YF, et al. A study on the application of modified CO₂ transfer and automatic injection system for the imaging of arteriovenous access for hemodialysis[J]. *Chinese Journal of Blood Purification*, 2021, 20(5): 347-350. doi: 10.3969/j. issn. 1671-4091.2021.05.015.
- [17] Mascoli C, Faggioli G, Gallitto E, et al. Standardization of a carbon dioxide automated system for endovascular aortic aneurysm repair[J]. *Ann Vasc Surg*, 2018, 51: 160-169. doi: 10.1016/j.avsg.2018.01.099.
- [18] 左健, 刘金成, 俞世强, 等. 新型全腔内经股动脉三分支覆膜支架系统治疗主动脉弓部病变的 FIM 研究[J]. *中国普通外科杂志*, 2024, 33(6):894-900. doi:10.7659/j.issn.1005-6947.2024.06.004.
- Zuo J, Liu JC, Yu SQ, et al. First-in-man study of a new femoral endovascular access supraarch branched stent graft for the treatment of aortic arch disease[J]. *China Journal of General Surgery*, 2024, 33(6): 894-900. doi: 10.7659/j. issn. 1005-6947.2024.06.004.
- [19] 孙文超, 刘涛, 裴长安, 等. Castor 支架在主动脉弓病变中重建左颈总动脉的可行性和有效性研究[J]. *中国普通外科杂志*, 2024, 33(6):909-917. doi:10.7659/j.issn.1005-6947.2024.06.006.
- Sun WC, Liu T, Pei CA, et al. Feasibility and efficacy of using Castor stent for reconstruction of the left common carotid artery in aortic arch lesions[J]. *China Journal of General Surgery*, 2024, 33(6):909-917. doi:10.7659/j.issn.1005-6947.2024.06.006.
- [20] Thomas RP, Viniol S, König AM, et al. Feasibility and safety of automated CO₂ angiography in peripheral arterial interventions[J]. *Medicine (Baltimore)*, 2021, 100(2): e24254. doi: 10.1097/MD.00000000000024254.
- [21] 董伟华, 肖湘生, 欧阳强, 等. 二氧化碳造影在移植肾动脉狭窄诊断和球囊扩张术中的应用[J]. *临床放射学杂志*, 2003, 22(3):220-223. doi:10.3969/j.issn.1001-9324.2003.03.013.
- Dong WH, Xiao XS, Ouyang Q, et al. Carbon dioxide angiography: its application to the diagnosis and balloon angioplasty of transplanted renal arterial stenosis[J]. *Journal of Clinical*

- Radiology, 2003, 22(3): 220–223. doi: 10.3969/j. issn. 1001–9324.2003.03.013.
- [22] 黄剑, 周大勇, 沈利明, 等. 二氧化碳造影在下肢动脉腔内治疗中的应用[J]. 介入放射学杂志, 2018, 27(3):211–214. doi:10.3969/j. issn.1008–794X.2018.03.005.
- Huang J, Zhou DY, Shen LM, et al. Application of manual carbon dioxide angiography in endovascular treatment for arteriosclerosis obliterans of lower extremity in patients with renal insufficiency or iodine allergy[J]. Journal of Interventional Radiology, 2018, 27(3): 211–214. doi:10.3969/j.issn.1008–794X.2018.03.005.
- [23] 李惠民, 董永华, 肖湘生, 等. 血液透析中血管通路的CO₂血管造影初步研究[J]. 中华放射学杂志, 2005, 39(4):370–374. doi: 10.3760/j.issn:1005–1201.2005.04.009.
- Li HM, Dong YH, Xiao XS, et al. CO₂ angiography of vascular access in hemodialysis: a preliminary report[J]. Chinese Journal of Radiology, 2005, 39(4): 370–374. doi: 10.3760/j. issn: 1005–1201.2005.04.009.
- [24] 卢伟, 李彦豪. 二氧化碳数字减影血管造影技术[J]. 实用放射学杂志, 2000, 16(3): 174–176. doi: 10.3969/j. issn. 1002–1671.2000.03.016.
- Lu W, Li YH. Digital Subtraction Angiography of Carbon Dioxide[J]. Journal of Practical Radiology, 2000, 16(3): 174–176. doi:10.3969/j.issn.1002–1671.2000.03.016.
- [25] 徐明芝, 李洪, 白亚飞, 等. CO₂血管内造影在血液透析动静脉通路中的应用[J]. 临床肾脏病杂志, 2022, 22(3): 184–189. doi: 10.3969/j.issn.1671–2390.2022.03.002.
- Xu MZ, Li H, Bai YF, et al. Application of carbon dioxide angiography during arteriovenous access of hemodialysis[J]. Journal of Clinical Nephrology, 2022, 22(3):184–189. doi:10.3969/j.issn.1671–2390.2022.03.002.
- [26] 卢伟, 杨超, 张嘉诚, 等. CO₂楔入肝静脉造影在肝硬化急性上消化道出血的TIPS术中的作用[J]. 中国医药导报, 2019, 16(10): 84–87.
- Lu W, Yang C, Zhang JC, et al. The effect of wedged hepatic venography with CO₂ during TIPS in the treatment of acute upper gastro-intestinal bleeding in liver cirrhosis[J]. China Medical Herald, 2019, 16(10):84–87.
- [27] 杜海军, 应争先, 王煜珏, 等. 二氧化碳在数字减影血管造影中的临床应用[J]. 临床医学, 2007, 27(11): 33–35. doi: 10.3969/j. issn.1003–3548.2007.11.016.
- Du HJ, Ying ZX, Wang YX, et al. Clinical application of CO₂-digital subtraction angiography[J]. Clinical Medicine, 2007, 27(11):33–35. doi:10.3969/j.issn.1003–3548.2007.11.016.
- [28] Ali F, Mangi MA, Rehman H, et al. Use of carbon dioxide as an intravascular contrast agent: a review of current literature[J]. World J Cardiol, 2017, 9(9):715–722. doi:10.4330/wjc.v9.i9.715.
- [29] Palena LM, Diaz-Sandoval LJ, Candeo A, et al. Automated carbon dioxide angiography for the evaluation and endovascular treatment of diabetic patients with critical limb ischemia[J]. J Endovasc Ther, 2016, 23(1):40–48. doi:10.1177/1526602815616924.
- [30] Lang EV, Gossler AA, Fick LJ, et al. Carbon dioxide angiography: effect of injection parameters on bolus configuration[J]. J Vasc Interv Radiol, 1999, 10(1): 41–49. doi: 10.1016/s1051–0443(99)70009–6.
- [31] 卢伟, 许小立, 李彦豪. CO₂-DSA研究新进展[J]. 生物医学工程与临床, 2002, 6(1): 55–58. doi: 10.3969/j. issn. 1009–7090.2002.01.020.
- Lu W, Xu XL, Li YH. Advancement of CO₂ digital subtraction angiography[J]. Biomedical Engineering and Clinical Medicine, 2002, 6(1):55–58. doi:10.3969/j.issn.1009–7090.2002.01.020.
- [32] Megale AB, Mendes CA, Teivelis MP, et al. Use of carbon dioxide for therapeutic decision-making in endoleaks: a case report[J]. J Vasc Bras, 2020, 19:e20200060. doi:10.1590/1677–5449.200060.
- [33] Fujihara M, Kawasaki D, Shintani Y, et al. Endovascular therapy by CO₂ angiography to prevent contrast-induced nephropathy in patients with chronic kidney disease: a prospective multicenter trial of CO₂ angiography registry[J]. Catheter Cardiovasc Interv, 2015, 85(5):870–877. doi:10.1002/ccd.25722.
- [34] Kawasaki D, Fujii K, Fukunaga M, et al. Safety and efficacy of endovascular therapy with a simple homemade carbon dioxide delivery system in patients with iliofemoral artery diseases[J]. Circ J, 2012, 76(7):1722–1728. doi:10.1253/circj.cj-11-1382.
- [35] Heye S, Maleux G, Marchal GJ. Upper-extremity venography: CO₂ versus iodinated contrast material[J]. Radiology, 2006, 241(1):291–297. doi:10.1148/radiol.2411050714.
- [36] Kariya S, Tanigawa N, Kojima H, et al. Efficacy of carbon dioxide for diagnosis and intervention in patients with failing hemodialysis access[J]. Acta Radiol, 2010, 51(9): 994–1001. doi: 10.3109/02841851.2010.518159.
- [37] Afsharirad A, Javankiani S, Noparast M. Comparing the accuracy and safety of automated CO₂ angiography to iodine angiography in peripheral arterial disease with chronic limb ischemia: a prospective cohort study[J]. Ann Med Surg (Lond), 2024, 87(2): 527–534. doi:10.1097/MS9.0000000000002955.
- [38] 何楠, 唐小斌, 梁紫轲, 等. AngioJet机械性血栓抽吸术治疗急性肺栓塞的疗效与安全性: 附3例报告并文献回顾[J]. 中国普通外科杂志, 2022, 31(6): 753–759. doi: 10.7659/j. issn. 1005–6947.2022.06.007.
- He N, Tang XB, Liang ZK, et al. Efficacy and safety of Angio Jet rheolytic thrombectomy for acute pulmonary embolism: a report of 3 cases and literature review[J]. China Journal of General Surgery, 2022, 31(6):753–759. doi:10.7659/j.issn.1005–6947.2022.06.007.

- [39] 许有江, 李从青, 王文艳. 血管造影剂的应用及进展[J]. 血管与腔内血管外科杂志, 2016, 2(1):88-92. doi:10.19418/j.cnki.issn2096-0646.2016.01.018.
- Xu YJ, Li CQ, Wang WY. The application and progress of intravascular contrast media[J]. Journal of Vascular and Endovascular Surgery, 2016, 2(1): 88-92. doi: 10.19418/j.cnki.issn2096-0646.2016.01.018.
- [40] Sasaki R, Maruhashi T, Kim M, et al. Severe liver injury successfully treated with transarterial embolization using carbon dioxide angiography: a case report[J]. Trauma Case Rep, 2024, 53: 101086. doi:10.1016/j.tcr.2024.101086.
- [41] Kakuta K, Chida K. Parameter optimisation for image acquisition and stacking in carbon dioxide digital subtraction angiography[J]. Radiol Phys Technol, 2024, 17(4): 862-868. doi: 10.1007/s12194-024-00841-7.
- [42] Corazza I, Rossi PL, Feliciani G, et al. Mechanical aspects of CO₂ angiography[J]. Phys Med, 2013, 29(1): 33-38. doi: 10.1016/j.ejmp.2011.11.003.
- [43] Cho KJ, Cho DR, Hawkins IF Jr. A simple DSA method to detect air contamination during CO₂ venous studies[J]. Cardiovasc Intervent Radiol, 2006, 29(4): 642-645. doi: 10.1007/s00270-005-0009-0.
- [44] Christmas KM, Bassingthwaite JB. Equations for O₂ and CO₂ solubilities in saline and plasma: combining temperature and density dependences[J]. J Appl Physiol (1985), 2017, 122(5):1313-1320. doi:10.1152/jappphysiol.01124.2016.
- [45] Sharafuddin MJ, Marjan AE. Current status of carbon dioxide angiography[J]. J Vasc Surg, 2017, 66(2): 618-637. doi:10.1016/j.jvs.2017.03.446.
- [46] Criado E, Upchurch GR Jr, Young K, et al. Endovascular aortic aneurysm repair with carbon dioxide-guided angiography in patients with renal insufficiency[J]. J Vasc Surg, 2012, 55(6):1570-1575. doi:10.1016/j.jvs.2011.11.142.
- [47] Sueyoshi E, Nagayama H, Sakamoto I, et al. Carbon dioxide digital subtraction angiography as an option for detection of endoleaks in endovascular abdominal aortic aneurysm repair procedure[J]. J Vasc Surg, 2015, 61(2):298-303. doi:10.1016/j.jvs.2014.07.088.
- [48] Heye S, Fournieu I, Maleux G, et al. Preoperative mapping for haemodialysis access surgery with CO₂ venography of the upper limb[J]. Eur J Vasc Endovasc Surg, 2010, 39(3): 340-345. doi: 10.1016/j.ejvs.2009.11.036.
- [49] Gyánó M, Csobay-Novák C, Berczeli M, et al. Initial operating room experience with digital variance angiography in carbon dioxide-assisted lower limb interventions: a pilot study[J]. Cardiovasc Intervent Radiol, 2020, 43(8):1226-1231. doi:10.1007/s00270-020-02530-5.
- [50] Thomas RP, Bastian MB, Viniol S, et al. Digital variance angiography in selective lower limb interventions[J]. J Vasc Interv Radiol, 2022, 33(2):104-112. doi:10.1016/j.jvir.2021.09.024.
- [51] Óriás VI, Gyánó M, Góg I, et al. Digital variance angiography as a paradigm shift in carbon dioxide angiography[J]. Invest Radiol, 2019, 54(7):428-436. doi:10.1097/RLI.0000000000000555.
- [52] Karalko A, Keša P, Jelínek F, et al. In vivo contrast imaging of rat heart with carbon dioxide foam[J]. Sensors (Basel), 2022, 22(14): 5124. doi:10.3390/s22145124.
- [53] Antonello M, Bilato MJ, Menara S, et al. Carbon dioxide cone-beam computed tomography for the technical assessment of endovascular aortic intervention[J]. J Vasc Surg Cases Innov Tech, 2024, 10(5):101580. doi:10.1016/j.jvscit.2024.101580.

(本文编辑 熊杨)

本文引用格式:何楠, 刘奕玮, 李青青, 等. 以二氧化碳为造影剂的血管造影技术的发展与应用[J]. 中国普通外科杂志, 2025, 34(6):1262-1274. doi: 10.7659/j.issn.1005-6947.250139

Cite this article as: He N, Liu YW, Li QQ, et al. Development and application of angiography technology using carbon dioxide as contrast agent[J]. Chin J Gen Surg, 2025, 34(6): 1262-1274. doi: 10.7659/j.issn.1005-6947.250139