

· 标准与规范 ·

心血管 CT 成像辐射剂量优化中国专家共识

中华医学会放射学分会质量控制与安全管理专业委员会

在美国和其他发达国家,心血管病的发病率和病死率在过去的 40 年中已显著降低。这与心血管病危险因素的有效控制、治疗策略的改进、无创性心血管成像等的应用有关。特别是,心血管 CT 成像正逐步向心血管病高危人群的精确诊断和危险度精细分层方向发展,已取代了一些传统的、具有较大风险的或诊断精确度较低的检查方法。我国心血管病患率处于持续上升阶段。这势必导致心血管 CT 越来越多的使用,随之而来的电离辐射损伤日益成为关注的重大问题。尽管目前还没有直接的证据表明 CT 的辐射损伤可以导致恶性肿瘤,但基于线性非阈值的理念,即使小剂量的电离辐射也可能有致癌风险。因此,尽可能低的辐射剂量(as low as reasonably achievable, ALARA)原则得到普遍认可,该原则要求在尽可能低的辐射剂量下,保证足够诊断的图像质量和诊断准确性^[1-4]。

近年来,提出了很多降低心血管 CT 辐射剂量的方法且均能在保证图像质量的同时降低辐射剂量,甚至降低对比剂的用量。2011 年国际心血管 CT 协会(society of cardiovascular CT, SCCT)出版了《心血管 CT 辐射剂量优化指南》;同年《中华放射学杂志》出版了《心脏冠状动脉多排 CT 临床应用专家共识》^[5],对指导心血管 CT 更安全使用起到很好的指导作用。鉴于 CT 技术的迅速发展及近年来在降低 CT 辐射剂量方面取得的进步,我们结合文献和当前国内实际情况,编写了本共识,期望对规范国内心血管 CT 的使用,降低心血管 CT 的辐射剂量起到更好的推动作用。

一、辐射剂量的测量

(一)CT 剂量指数、加权 CT 剂量指数和容积 CT 剂量指数

CT 的基本辐射剂量参数是 CT 剂量指数(CT dose index, CTDI),它表示沿着 Z 轴方向产生一层图像的辐射剂量值。该数值等于单次横断面扫描时轴位吸收剂量除以总的 X 线束宽度。

加权 CT 剂量指数(weighted CT dose index, CTDI_w)是电离辐射在辐射中心和边缘的加权平均值,即在辐射中心计算的 CTDI 值的 1/3 与在外围计算的 CTDI 值的 2/3 之和。该参数有助于解决 X 射线剂量在体内的不均匀性,反映人体

接受的真实剂量。

容积 CT 剂量指数(volume CT dose index, CTDI_{vol})反映的是 CT 扫描时对于标准参考模型辐射剂量的输出水平,考虑了 X 线在 Z 轴方向上层边缘产生的“尾部区域”。CTDI_{vol} 等于 CTDI_w 与螺距的比值。

(二)剂量-长度乘积

CTDI_{vol} 在沿纵向或 Z 轴方向上无论 CT 扫描范围长短都是相等的,然而每次 CT 扫描传递给患者的辐射总量并非相同。通过计算剂量-长度乘积(dose-length-product, DLP)可以估算一定扫描范围内的辐射剂量。DLP 是 CTDI_{vol} 与扫描长度的乘积。CT 扫描仪可在扫描完成后同时显示 DLP 与 CTDI_{vol},用于估算有效剂量^[6-8]。

(三)体型特异性剂量估算值

在儿童和成年人人体 CT 成像中,美国医学物理学家协会认为应用 CTDI 和体型特异性剂量估算值(size-specific dose estimate, SSDE)能更精确地评估辐射剂量。SSDE 是基于 CT 扫描后显示的 CTDI_{vol} 和体型相关转换系数估算得到的,是经过体型校正的患者接受的 CT 剂量估算值,用来评估患者接收的辐射剂量^[9]。

(四)吸收剂量、器官剂量和有效剂量

在 CT 中直接测量的吸收剂量是身体内不同组织吸收的能量总和。不同器官的吸收剂量表达为器官剂量。吸收剂量在位于主要 X 线束中心的器官中最大,毗邻的器官只吸收内部的散射线。

有效剂量是一种描述非均匀性辐射照射风险的剂量参数,它考虑到在一次 CT 扫描中受到照射的所有器官以及对辐射诱导性突变相对应的敏感性。在临床实践中,有效剂量的合理估算可通过 CT 扫描仪提供的 DLP 与权重因数(k)的乘积得到,其中 k 仅取决于受照射部位。如,用于估算成年患者胸部 CT 检查有效剂量的 k 值为 $0.014 \text{ mSv} \cdot \text{mGy}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ ^[10-11]。

二、辐射风险

(一)健康影响

电离辐射对健康影响有两个效应,即随机效应和非随机效应(确定性效应)。随机效应随辐射剂量增加而增加,如辐射致癌和基因效应都是随机效应。非随机效应指的是小剂量辐射引起生物学损害的发生概率为零,但当辐射剂量高于某一阈值时,其发生概率随剂量增加而明显增加,效应的严重程度随超过阈值的剂量增高而增加。确定性效应包括白内障、皮肤烧伤、红疹、脱发,甚至死亡。

(二)风险模型

DOI:10.3760/cma.j.issn.0376-2491.2016.07.004

通信作者:卢光明,210000 南京军区南京总医院 南京大学医学院附属金陵医院医学影像科,Email:cjr_luguangming@vip.163.com; 刘士远,200003 上海,第二军医大学附属长征医院医学影像科,Email:cjr_liushiyan@vip.163.com

诊断性成像,包括 X 线和 CT 的辐射剂量在低剂量(0.5~30 mSv)范围内。许多模型用于描述低剂量辐射照射与随机效应风险之间的关系,包括刺激作用模型、线性非阈值模型以及阈值上模型,其中线性非阈值模型是目前放射防护理论的基础,它假设所有剂量水平的风险与剂量呈正比,甚至与最低的辐射剂量也相关。

(三)高风险组

辐射风险的决定因素不仅包括辐射剂量水平,还有受检者体型、年龄及性别等。在相同辐射剂量的照射下,体型小的患者较体型大的患者风险大,年轻患者较年长患者风险大,儿童患者较成年患者风险大。另外,不同性别的辐射风险也有差异。相同辐射照射剂量下,女性患者罹患乳腺癌的风险较男性患者大^[12-15]。

三、降低 CT 辐射剂量的方法

(一)CT 检查前

1. 重视 CT 辐射的基础教育:增强对医务工作者、患者和公众 CT 辐射损伤的基础教育是增强辐射安全性的基本措施。主要包括对临床医师、医护工作人员、患者和公众的辐射暴露风险教育,使患者和医师理解心血管 CT 检查潜在的利益和风险。在临床实践中临床医师应遵循循证医学原则,在权衡利益和风险比的情况下选择最优的影像检查技术并能与患者进行有效沟通,使其了解相关知识并积极配合检查。

2. 检查适应证的评估:临床工作中应严格掌握适应证,避免不必要的检查。心脏 CT 检查的适应证可参考 2010 年美国心脏病学会提出的心脏 CT 检查适应证标准^[16]。临床医师应充分了解心血管 CT 检查的适应证、潜在优势和风险,充分考虑其优劣性并权衡利弊以选择最合适的检查技术。进行心血管 CT 检查时,影像科医师或技师应根据临床要求选择合适的扫描方案。对细微结构的评估,如对冠状动脉斑块的评估,常需要更加规范技术扫描以获得高分辨率的图像,而对于粗大结构的评估,如对肺静脉、心肌、心腔和心包结构的评估可适当降低辐射剂量。

(二)CT 检查中

1. 扫描模式的合理选择:CT 数据采集分为螺旋扫描和轴位扫描。螺旋扫描时,检查床向前移动的同时机架连续旋转并采集数据。轴位扫描时,检查床静止不动,机架和探测器旋转 360°或 180°并采集数据,进床在两次数据采集中间进行。对无需心电门控的心血管 CT 扫描(如 CT 下肢动脉成像),推荐行螺旋扫描。心脏或冠状动脉 CT 成像则需要心电门控技术以减轻运动伪影。目前,临床上用于心电门控心脏 CT 成像的扫描模式主要包括回顾性心电门控螺旋扫描、前瞻性心电门控轴位扫描及前瞻性心电门控大螺距扫描。

(1)回顾性心电门控螺旋扫描:该技术 X 线球管在整个心动周期内持续发射 X 线,球管和探测器连续旋转的同时扫描床连续移动,采集完整的心动周期数据。在该扫描模式中,回顾性心电门控螺旋扫描的辐射剂量最高,可达 9~

21 mSv(平均 15 mSv)^[17],主要应用于心率快、心律不齐或需要进行心功能评估的患者。然而,对许多适应证而言,只需用伪影最少的心动周期时相进行影像重组,其他时相的数据是不需要的。基于此开发了根据患者心电图(ECG)信号调节管电流的算法,即 ECG 管电流调制技术,该技术在心动周期的某些时相使用高管电流而在其他时相使用低管电流,如对心率较慢的患者在 R-R 间期的 70%左右采用高管电流扫描,而在其他时相采用低管电流扫描。与无 ECG 管电流调制技术的回顾性心电门控技术相比,使用该算法辐射剂量降低约 45%~48%^[18]。

(2)前瞻性心电门控轴位扫描:该技术只在某一预定的 R-R 间期内进行数据采集,进床和数据采集分别进行直至采集完整扫描范围的数据,辐射剂量低于回顾性心电门控螺旋扫描。该扫描模式也可根据心率和心律不同选择曝光窗范围,亦可同时结合使用 ECG 电流调制技术。在利用宽探测器(如 320 排探测器)的 CT 机型中,甚至只需在一个心动周期的某一时相进行数据采集而无需要床移动,可更大幅度地降低辐射剂量。一项基于 64 层 CT 的多中心研究显示前瞻性心电门控轴位扫描较回顾性心电门控螺旋扫描可降低 69%的辐射剂量而不影响图像质量^[19]。因此,在 CT 设备允许的条件下,推荐使用前瞻性心电门控轴位扫描。然而,在选择前瞻性心电门控轴位扫描前,需特别掌握其适用标准。前瞻性心电门控轴位扫描需要患者心率慢(≤ 65 次/min)且心律稳定以获得满足诊断的图像质量。在某些具有较快的旋转时间或者使用多个球管或探测器的 CT 机型中,因为时间分辨率的提高可允许较快心率的患者进行前瞻性心电门控轴位扫描。另外,自动识别异常心律的算法可在探测到异常心律后自动推迟轴位数据采集直至心律稳定后,使前瞻性心电门控轴位扫描还适用于某些心律失常(如室性早搏)的患者。前瞻性心电门控轴位扫描的主要不足是图像可能存在错层伪影且扫描时间相对较长,错层伪影随进床次数减少而降低。

(3)前瞻性心电门控大螺距螺旋扫描:回顾性心电门控螺旋扫描的螺距一般 <1 (如 0.22),会导致心脏数据的重复采集,增加辐射剂量;然而不适当的增大螺距会出现数据缺失而导致图像重建时产生伪影及错位。双源 CT 机架内有两个 X 线球管,第 2 套球管/探测系统可填补数据缺失,使最大螺距可增至 3.4。前瞻性心电门控大螺距扫描可在一个心动周期内完成数据采集,明显缩短扫描时间,大幅度降低辐射剂量。研究显示,前瞻性心电门控大螺距扫描的辐射剂量可降至 1 mSv 以下^[20-21]。为保证图像质量,使用前瞻性心电门控大螺距扫描需严格筛选患者,建议根据 CT 扫描仪条件,将患者心率控制在 ≤ 65 次/min 或 ≤ 70 次/min 且为窦性心律。

推荐意见:

操作者需根据 CT 机型、患者的心率及心律、临床适应证等选择合适的扫描方案来降低患者接受的辐射剂量。当患者心率慢(一般 <65 次/min)且为窦性心律时,推荐使用

前瞻性心电门控轴位扫描(前瞻性心电门控宽探测器轴位扫描)或前瞻性心电门控大螺距螺旋扫描;在 CT 设备许可的情况下,当患者心率 > 65 次/min 并为窦性心律时可使用前瞻性心电门控轴位扫描;心律不齐患者,如室性早搏,在配备有自动识别异常心律功能算法的设备也可适当选用前瞻性心电门控轴位扫描;严重心律不齐的患者则推荐使用回顾性心电门控联合 ECG 管电流调制/自动管电压调制技术进行扫描。

2. 降低管电压:管电压决定了 X 线的质,与辐射剂量的平方呈正比,降低管电压可有效降低辐射剂量。临床上可供选择的管电压有 70、80、100 及 120 kV。目前,心血管 CT 成像的管电压可手动选择,也可使用智能管电压调节技术自动选择最合适的管电压。2011 年 SCCT 指南推荐根据患者体质质量或体质指数(body mass index, BMI)来选择心血管 CT 检查时的管电压,指出对体重 ≤ 90 kg 或 BMI ≤ 30 kg/m² 的患者选择 100 kV 管电压,对体重 > 90 kg 或 BMI > 30 kg/m² 患者选用 120 kV 管电压,对过度肥胖者可选用更高的管电压^[22]。此指南主要根据欧美人群的体型来设定。本专家共识推荐对体重 ≤ 70 kg 或 BMI ≤ 25 kg/m² 的国人受检者选择 80 kV 管电压,对 70 kg $<$ 体重 ≤ 90 kg 或 25 $<$ BMI ≤ 30 kg/m² 的患者选择 100 kV 管电压,对过度肥胖患者选用 120 kV 管电压。在应用上述标准时,建议结合使用迭代重建算法以改善图像质量。近年来,70 kV 管电压也被尝试用于成人心血管 CT 成像中。Zhang 等^[23]的研究表明在第二代双源 CT 上,70 kV 可用于 BMI ≤ 25 kg/m² 患者的冠状动脉 CT 成像中。最近,Meinel 等^[24]研究显示在第三代双源 CT 上,70 kV 甚至可用于肥胖患者的冠状动脉 CT 成像中,然而其常规的临床应用尚需大量研究证实。另外,70 kV 下肢动脉、肺动脉、胸主动脉 CT 成像亦见报道^[25-28],但临床实际应用 70 kV 心血管 CT 成像时需严格掌握其适应证,如控制患者的 BMI、成像部位等。

自动管电压调节技术可根据患者 CT 定位像上扫描部位的衰减特征及检查目的(CT 平扫、增强或血管成像)选择最优化的管电压及管电流进行心血管 CT 扫描并维持图像合适的对比噪声比,兼顾了图像质量及辐射剂量。研究显示,自动管电压调制技术可使冠状动脉 CT 成像受检人群的辐射剂量降低 35%^[29]。张俊等^[30]的研究亦显示使用自动管电压调制技术的冠状动脉 CT 成像可在不影响图像质量的条件下使患者接受的辐射剂量降低 60%。

降低管电压的主要不足是增加图像噪声,潜在影响诊断,因此在使用低管电压技术时,推荐使用迭代重建算法来降低图像噪声,以保证图像质量。

需要指出的是,低管电压更加接近碘的 K 边缘值,可增加碘对比剂的光电效应,提高血管对比度。因此在达到相同的满足诊断的血管强化程度情况下,使用低管电压 CT 技术可适当使用低碘浓度对比剂或降低对比剂注射速率,从而降低对比剂用量或碘负荷,是降低对比剂用量的一种常用方法。Luo 等^[31]的研究显示行 80 kV 头颅 CT 血管成像时使用

30 ml 对比剂(300 mgI/ml)即可获得足够诊断的图像质量,并没有降低诊断颅内动脉瘤的准确性。

推荐意见:

检查者需根据患者体型、检查部位选择合适的管电压来降低辐射剂量并维持图像质量。对于无自动管电压调制技术的 CT 机型,操作者可根据患者体质量或 BMI 来选择管电压;对有自动管电压调制技术的 CT 机型,推荐将其作为选择管电压的主要技术,该法操作简单,可减少受检人群的辐射剂量。需要注意的是,在选择低管电压行心血管 CT 检查时应联合使用迭代重建算法以确保图像质量不受损。此外,行低管电压心血管 CT 检查时可以适当减少对比剂用量/碘负荷。

3. 降低管电流:管电流决定 X 线的量,与辐射剂量呈正比,降低管电流可降低辐射剂量。临床上降低管电流的方法有 ECG 管电流调制技术及自动管电流调制技术。ECG 管电流调制技术及自动管电流调制技术常不能连用。自动管电流调制技术可根据组织在 X、Y 及 Z 轴的厚度自动调节管电流而不影响图像噪声。使用 ECG 管电流调制技术的前提是患者心律稳定,其最大管电流扫描窗应根据患者心率进行调整:当心率 ≤ 65 次/min 时,选择 70% ~ 80% 的 R-R 间期为最大管电流扫描窗;心率 > 65 次/min 时,选择 40% ~ 80% 的 R-R 间期为最大管电流扫描窗。

推荐意见:

对心电门控心血管 CT 扫描,如冠状动脉 CT 成像时,建议使用 ECG 管电流调制技术来降低管电流,通过缩小高管电流扫描窗来降低辐射剂量。对非心电门控的心血管 CT 扫描,如 CT 腹主动脉成像建议使用自动管电流调制技术在保证图像质量的同时降低辐射剂量。

4. 增大螺距:螺距为机架旋转一周床移动的距离与总线束宽度的比值。螺距与辐射剂量呈反比,适当增大螺距可减少数据的重复采集,减少辐射剂量,比如螺距增加 1 倍,辐射剂量会降低 50%。行普通 CT 检查时,螺距一般在 0 ~ 2 之间,常选择 1。临床上行冠状动脉 CT 成像时,因机架旋转较快且心脏处于运动状态,常需要用较小的螺距(通常 < 1 , 如 0.22)来避免容积数据的缺失。较新型 CT 设备的螺距最大可增至 3.4,辐射剂量大幅度降低。研究表明使用前瞻性心电门控大螺距扫描可使冠状动脉 CT 成像的辐射剂量降至 1 mSv 以下^[20-21]。大螺距扫描对患者心率有严格要求,推荐在慢心率(< 65 次/min)且窦性心律的患者中使用。

增大螺距可减少扫描时间,可在较短的对比剂峰值持续时间内完成数据采集,从而大幅度减少对比剂的用量。Zhang 等^[23]使用 70 kV 管电压及前瞻性心电门控大螺距技术行冠状动脉 CT 成像检查时仅使用了 30 ml 对比剂就获得足够的图像质量和诊断准确性。

推荐意见:

行心血管 CT 成像时,可根据 CT 扫描仪的软硬件条件,适当增加螺距以减少辐射剂量。需要注意的是,行大螺距冠状动脉 CT 成像时,要求患者心律齐且心率 < 65 次/min。

5. 缩短扫描长度:扫描长度是决定剂量长度乘积(DLP)的重要因素,与辐射剂量呈正比。因此,在满足临床诊断条件下应尽可能缩短扫描长度。扫描长度通常可使用定位像上的解剖标示决定。在冠状动脉 CT 成像中,对无旁路移植行心脏成像的患者,可根据定位像(气管隆突下至心尖部)或钙化积分扫描(包括所有冠状动脉和心脏的图像再向上、向下各增加 10 mm)进行定位扫描。推荐使用钙化积分图像进行定位。进行心血管 CT 扫描时,应训练患者的呼吸,使其每一次屏气保持相同的深度避免扫描时丢失必要的解剖结构。

推荐意见:

行心血管 CT 扫描时,检查者需根据患者定位像或其他扫描图像(如钙化积分图像或平扫)在获得靶血管成像的条件下尽可能缩短扫描范围以降低辐射剂量。

6. 前置滤器的使用:前置滤器通过对 X 线的重新分布和过滤,吸收低能的 X 线,减少患者接受的辐射剂量。心血管 CT 扫描时,需根据患者体型选择适当的滤过器进行数据采集^[32]。

7. 新型探测器的使用:常规固体探测器光电二极管阵列把可见光转换成电流,然后传输给电子线路板上远端的模数转换器转换成数字信号,电信号传输过程中会产生大量电子噪声及热噪声并存在电信号的损耗,降低图像的密度分辨率和空间分辨率,导致 CT 图像质量下降。新型探测器,如 Stellar 探测器可将光电二极管和数模转换器集成一个专用整合回路,减少电子噪声、热噪声及信号消损,提高图像质量。需注意的是,该方法并不能直接降低辐射剂量,在保持相同图像质量的前提下,使用新型探测器时可以使用低辐射剂量的心血管 CT 成像技术,因此具有降低 CT 辐射剂量的潜能。

推荐意见:

综合使用多种降低辐射剂量的 CT 技术,在合适的临床适应证和患者自身条件(心率、心律、体质量、BMI)基础上,在不影响图像质量和诊断准确性的同时,可最大程度降低辐射剂量和对比剂用量。需注意的是,心血管 CT 成像的图像质量不仅与扫描模式、管电压、管电流等因素有关,还与对比剂浓度、注射方法、注射速率等有关,在进行 CT 扫描时需充分考虑多方面的因素。

(三)CT 检查后

1. 使用迭代重建算法:迭代重建算法是假定了所有像素的初始衰减系数并使用这些系数预测投影数据,预测的投影数据与实际测量的投影数据进行比较并反复修改直到预测和实际的数据间误差可以被接受。与传统滤波反投影算法相比,迭代重建算法可降低图像噪声、减少图像伪影,在低辐射剂量 CT 扫描时保持图像的信噪比且不影响图像空间分辨率。目前,临床上使用的迭代重建算法主要有适应统计迭代重建(ASiR)、自适应低剂量迭代(AIDR)、第 4 代迭代重建(iDose4)、原始数据迭代重建(SAFIRE)等。在 CT 扫描时,需根据 CT 扫描的类型(平扫、血管成像等)及扫描参数

选择最优的重建等级。迭代重建算法不具有直接降低辐射剂量的能力,但可以在进行低辐射剂量/或低对比剂负荷的心血管 CT 扫描时不增加图像噪声,稳定图像质量,因此可间接降低辐射剂量。Yin 等^[33]的研究显示应用迭代重建可以使用既往 50% 的曝光条件完成冠状动脉 CT 成像检查,使患者接受的辐射剂量下降 52% 而不影响诊断的敏感度、特异度和准确度。在进行低辐射剂量心血管 CT 扫描时,推荐使用优化的迭代重建算法进行图像重建。

2. 适度增加重建层厚:图像噪声与重建层厚的平方根呈正比。增加层厚可降低图像噪声,但会降低图像空间分辨率,不适于评价心脏细微结构,如二级以下的冠状动脉。但评估大的心血管结构,如主动脉、肺静脉时,在满足诊断要求的前提下,可采用低辐射剂量 CT 扫描方案并使用较厚的重建层厚以降低辐射剂量。

四、临床实践中心血管 CT 成像辐射剂量优化算法

(一)冠状动脉钙化积分扫描

冠状动脉钙化积分对预测心血管事件有明确的价值,但冠状动脉钙化积分 CT 扫描会增加 CT 扫描总的辐射剂量,在冠状动脉 CT 成像前是否需要行冠状动脉钙化积分扫描应依据临床适应证合理选择。当冠状动脉钙化积分扫描显示冠状动脉严重钙化时,可不进行冠状动脉 CT 成像检查^[22]。推荐使用前瞻性心电门控螺旋扫描(有条件时采用前瞻性心电门控大螺距螺旋扫描)进行冠状动脉钙化积分扫描以最大程度地降低辐射剂量。在只能使用回顾性心电门控的情况下,推荐联合应用 ECG 管电流调制技术,使用尽可能低的管电流并将高管电流扫描窗尽可能缩短。层厚设置为 3 mm。不推荐使用低管电压技术行冠状动脉钙化积分扫描,因为低管电压条件下的重建阈值等设定尚未标准化。

(二)冠状动脉 CT 成像

诊断或排除冠状动脉狭窄性病变是行冠状动脉 CT 成像的主要指征。行冠状动脉 CT 成像时需对患者相关因素进行评估,选择最优的扫描方案以使用最低的辐射剂量获得能满足诊断的图像质量。应尽量降低患者心率并稳定心律以便使用低辐射剂量的 CT 扫描方案,建议在无禁忌证的高心率患者使用 β 受体阻滞剂以降低心率。推荐的辐射剂量优化的冠状动脉 CT 成像方案如图 1。

研究显示,冠状动脉旁路移植术后 5 年内有 25% 的患者发生桥血管的狭窄或闭塞^[34],因此,对搭桥血管进行随访复查至关重要。由于桥血管较长,因此冠状动脉旁路移植术后冠状动脉 CT 成像的扫描范围较常规冠状动脉 CT 成像扫描范围大,辐射剂量高,约为常规冠状动脉 CT 成像的 2 倍左右(9 ~ 19 mSv)^[35-36]。推荐使用前瞻性心电门控轴位扫描模式。研究显示,使用前瞻性心电门控轴位扫描模式的辐射剂量可较回顾性心电门控螺旋扫描模式的辐射剂量降低 65% 左右^[37]。

(三)胸痛三联征检查

胸痛三联征包括肺栓塞、主动脉夹层及急性冠状动脉综合征。胸痛三联征 CT 成像需要在一次检查中对肺动脉、主

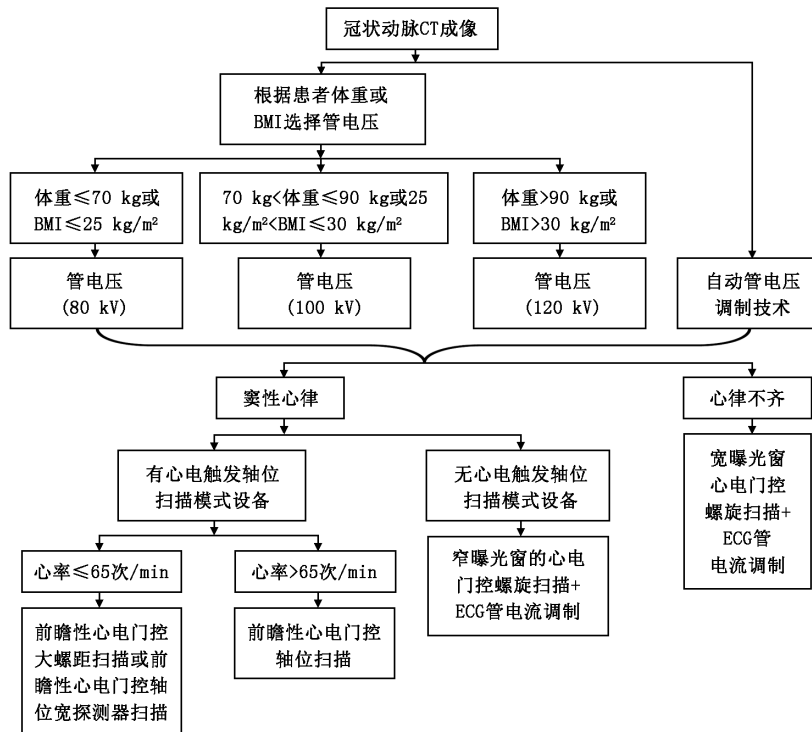


图1 冠状动脉CT成像辐射剂量优化流程 BMI, 体质量指数, ECG, 心电图

动脉及冠状动脉进行成像,扫描范围大,辐射剂量高,限制了其临床应用。近年来随着低辐射剂量CT技术的快速发展,低管电压、大螺距等技术的应用,使胸痛三联征CT扫描的辐射剂量大幅度降低,促进了其在临床的应用。推荐使用低管电压、前瞻性心电门控大螺距技术及迭代重建算法进行胸痛三联征CT扫描。Kligerman等^[38]的研究显示,使用低管电压、前瞻性心电门控大螺距扫描模式进行胸痛三联征CT扫描的辐射剂量可低至1.39 mSv。

(四) 心肌灌注及心肌延迟成像

CT心肌灌注成像可同时评估冠状动脉疾病以及心肌缺血情况,其主要不足为辐射剂量高。在有临床适应证时,推荐在宽探测器或者双源CT上使用低管电压及前瞻性心电门控螺旋扫描行心肌灌注成像。CT延迟成像可评估心肌梗死,其主要不足为图像的对比噪声比差。在有临床适应证时,推荐采用降低管电压并增加管电流的扫描方案提高CT心肌灌注或延迟成像图像的对比噪声比并减少辐射剂量。

(五) 非冠状动脉心脏CT扫描

对无需使用心电门控的血管CT成像,可根据临床适应证、患者自身条件及扫描仪等具体情况,合理选择自动管电压调制技术/低管电压、自动管电流调制技术/低管电流、大螺距以及迭代重建算法等扫描方案,在获得满足诊断的图像质量和诊断准确性的前提下,降低受检者接受的辐射剂量和碘对比剂负荷。

(六) 双能量血管CT成像

双能量CT扫描是指通过使用双球管或者快速kV切换等技术几乎同时采集两种能量的数据,并基于二物质或三物

质解析等数学算法进行图像后处理分析,得到组织器官功能和物质成分信息等,具有一定的临床价值。双能量CT血管成像中的应用主要有碘图(如可观察肺灌注)、减少线束硬化伪影、去除钙化斑块及骨、斑块成分分析等。通过双能量数据处理得到的虚拟平扫可替代常规CT平扫以减少辐射剂量,虚拟平扫的图像质量稍低于常规平扫图像,但总体上不影响诊断。另外,选择低的管电压组合也可降低辐射剂量。一般有80 kV/140 kV及100 kV/140 kV两种管电压组合模式,选择80 kV/140 kV时辐射剂量较100 kV/140 kV低,但是会增加图像噪声,推荐联用迭代重建算法来降低图像噪声。同时,适当降低管电流或增大螺距并联用迭代重建算法亦可降低辐射剂量,且能维持足够的图像质量。

五、结论

心血管CT检查是把“双刃剑”,能快速获得高质量诊断图像的同时,辐射损伤和对对比剂肾损害也不容忽视。临床医师应根据临床适应证和患者自身的特点(如心率、心律、体型等)、检查机构的CT设备条件等选择合适的扫描方案以最大程度地降低受检者接受的辐射剂量。多种低辐射剂量扫描方案的联合应用可以在保证图像质量和诊断准确性的前提下最大程度地降低辐射剂量。放射科医师/技师应熟悉并掌握CT扫描技术的优势、不足及其适应证,及时更新自身相关知识、制定个性化CT扫描方案,降低受检者接受的辐射剂量,提升CT检查的安全性。

本共识专家委员会名单:

主任委员:卢光明(南京军区南京总医院南京大学医学院附属金陵医院)、刘士远(第二军医大学附属长征医院)

副主任委员:伍建林(大连大学附属中山医院)

执笔人:张龙江(南京军区南京总医院 南京大学医学院附属金陵医院)

编写及审阅专家(按汉语拼音排序):白人驹(天津医科大学总医院)、崔进国(石家庄白求恩国际和平医院)、董丹丹(哈尔滨医科大学附属第四医院)、范占明(首都医科大学附属安贞医院)、高宏(中华放射学杂志编辑部)、郭顺林(兰州大学第一医院)、韩萍(华中科技大学同济医学院附属协和医院)、洪楠(北京大学人民医院)、胡道予(华中科技大学同济医学院附属同济医院)、焦俊(贵阳医学院附属医院)、李澄(东南大学附属中大医院)、李建军(海南省人民医院)、李明利(北京协和医院)、刘挨师(内蒙古医学院附属医院)、刘含秋(复旦大学附属华山医院)、刘士远(第二军医大学附属长征医院影像科)、刘文亚(新疆医科大学第一附属医院)、卢光明(南京军区南京总医院 南京大学医学院附属金陵医院)、罗天友(重庆医科大学附属第一医院)、吕滨(中国医学科学院阜外心血管病医院)、马林(解放军总医院)、彭卫军(复旦大学附属肿瘤医院)、祁丽(南京军区南京总医院 南京大学医学院附属金陵医院)、史大鹏(河南省人民医

院)、唐立钧(南京医科大学第一附属医院)、王骏(南京军区南京总医院南京大学医学院附属金陵医院)、王维(中南大学湘雅三医院)、王未(南京军区南京总医院南京大学医学院附属金陵医院)、伍建林(大连大学附属中山医院)、萧毅(第二军医大学附属长征医院)、徐凯(徐州医学院附属医院)、许乙凯(南方医科大学南方医院)、严福华(上海交通大学附属瑞金医院)、杨立(解放军总医院)、杨维竹(福建医科大学附属协和医院)、银武(西藏自治区人民医院)、袁建华(浙江省人民医院)、张辉(山西医科大学第一医院)、张龙江(南京军区南京总医院 南京大学医学院附属金陵医院)、张敏鸣(浙江大学医学院附属第二医院)、张明(西安交通大学第一附属医院)、张永海(青海大学附属医院)、赵卫(昆明医科大学第一附属医院)、周纯武(中国医学科学院肿瘤医院)、周顺科(中南大学湘雅二医院)、朱力(宁夏医科大学总医院)、朱文珍(华中科技大学同济医学院附属同济医院)、曾献军(南昌大学第一附属医院)、詹松华(上海中医药大学曙光医院)

参 考 文 献

- [1] Goetti R, Leschka S, Boschung M, et al. Radiation doses from phantom measurements at high-pitch dual-source computed tomography coronary angiography [J]. *Eur J Radiol*, 2012, 81(4):773-779. DOI:10.1016/j.ejrad.2011.01.068.
- [2] Bischoff B, Hein F, Meyer T, et al. Comparison of sequential and helical scanning for radiation dose and image quality: Results of the prospective multicenter study on radiation dose estimates of cardiac CT angiography (PROTECTION) I study [J]. *AJR Am J Roentgenol*, 2010, 194(6):1495-1499. DOI:10.2214/AJR.09.3543.
- [3] Jun BR, Yong HS, Kang EY, et al. 64-slice coronary computed tomography angiography using low tube voltage of 80 kV in subjects with normal body mass indices: Comparative study using 120 kV [J]. *Acta Radiol*, 2012, 53(10):1099-1106. DOI:10.1258/ar.2012.110573.
- [4] Hausleiter J, Meyer TS, Martuscelli E, et al. Image quality and radiation exposure with prospectively ECG-triggered axial scanning for coronary CT angiography: The multicenter, multivendor, randomized PROTECTION-III study [J]. *JACC Cardiovas Imaging*, 2012, 5(5):484-493. DOI:10.1016/j.jcmg.2011.12.017.
- [5] 中华放射学杂志心脏冠状动脉多排 CT 临床应用写作组. 心脏冠状动脉多排 CT 临床应用专家共识[J]. *中华放射学杂志*, 2011, 45(1):9-17. DOI:10.3760/cma.j.issn.1005-1201.2011.01.003.
- [6] Feng Q, Yin Y, Hua X, et al. Prospective ECG triggering versus low-dose retrospective ECG-gated 128-channel CT coronary angiography: comparison of image quality and radiation dose [J]. *Clin Radiol*, 2010, 65(10):809-814. DOI:10.1016/j.crad.2010.05.005.
- [7] Sabarudin A, Sun Z, Ng KH. Coronary computed tomography angiography with prospective electrocardiography triggering: a systematic review of image quality and radiation dose [J]. *Singapore Med J*, 2013, 54(1):15-23.
- [8] Sun Z, Ng KH. Prospective versus retrospective ECG-gated multislice CT coronary angiography: A systematic review of radiation dose and diagnostic accuracy [J]. *Eur J Radiol*, 2012, 81(2):e94-e100. DOI:10.1016/j.ejrad.2011.01.070.
- [9] Samuel L, Robert A. Investigation of American Association of Physicists in Medicine report 204 size-specific dose estimates for pediatric CT implementation [J]. *Radiology*, 2012, 265(3):832-840. DOI:10.1148/radiol.12120131.
- [10] Hou Y, Yue Y, Guo W, et al. Prospectively versus retrospectively ECG-gated 256-slice coronary CT angiography: image quality and radiation dose over expanded heart rates [J]. *Int J Cardiovasc Imaging*, 2012, 28(1):153-162. DOI:10.1007/s10554-010-9760-7.
- [11] Ghoshhajra BB, Engel LC, Károlyi M, et al. Cardiac computed tomography angiography with automatic tube potential selection effects on radiation dose and image quality [J]. *J Thorac Imaging*, 2013, 28(1):40-48. DOI:10.1097/RTI.0b013e3182631e8a.
- [12] Weustink AC, Molle NR, Neefjes LA, et al. Preserved diagnostic performance of dual-source CT coronary angiography with reduced radiation exposure and cancer risk [J]. *Radiology*, 2009, 252(1):53-60. DOI:10.1148/radiol.2521082023.
- [13] Li S, Ni Q, Wu H, et al. Diagnostic accuracy of 320-slice computed tomography angiography for detection of coronary artery stenosis: Meta-analysis [J]. *Int J Cardiol*, 2013, 168(3):2699-2705. DOI:10.1016/j.ijcard.2013.03.023.
- [14] Hosch W, Hofmann NP, Mueller D, et al. Body mass index-adapted prospective coronary computed tomography angiography. Determining the lowest limit for diagnostic purposes [J]. *Eur J Radiol*, 2013, 82(5):e232-e239. DOI:10.1016/j.ejrad.2012.12.013.
- [15] Layritz C, Muschiol G, Flohr T, et al. Automated attenuation-based selection of tube voltage and tube current for coronary CT angiography: Reduction of radiation exposure versus a BMI-based strategy with an expert investigator [J]. *J Cardiovasc Comput Tomogr*, 2013, 7(5):303-310. DOI:10.1016/j.jcct.2013.08.010.
- [16] Taylor AJ, Cerqueira M, Hodgson JM, et al. ACCF/SCCT/ACR/AHA/ASE/ASNC/NASCI/SCAI/SCMR 2010 Appropriate Use Criteria for Cardiac Computed Tomography. A Report of the American College of Cardiology Foundation Appropriate Use Criteria Task Force, the Society of Cardiovascular Computed Tomography, the American College of Radiology, the American Heart Association, the American Society of Echocardiography, the American Society of Nuclear Cardiology, the North American Society for Cardiovascular Imaging, the Society for Cardiovascular Angiography and Interventions, and the Society for Cardiovascular Magnetic Resonance [J]. *J Am Coll Cardiol*, 2010, 56(22):1864-1894. DOI:10.1016/j.jacc.2010.07.005.
- [17] Scheffel H, Alkadhi H, Leschka S, et al. Low-dose CT coronary angiography in the step-and-shoot mode: diagnostic performance [J]. *Heart*, 2008, 94(9):1132-1137. DOI:10.1136/hrt.2008.149971.
- [18] Jakobs TF, Becker CR, Ohnesorge B, et al. Multislice helical CT of the heart with retrospective ECG gating: reduction of radiation exposure by ECG-controlled tube current modulation [J]. *Eur Radiol*, 2002, 12(5):1081-1086. DOI:10.1007/s00330-001-1278-x.
- [19] Hausleiter J, Martinoff S, Hadamitzky M, et al. Image quality and radiation exposure with a low tube voltage protocol for coronary CT angiography results of the PROTECTION II Trial [J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2010, 3(11):1113-1123. DOI:10.1016/j.jcmg.2010.08.016.
- [20] Achenbach S, Marwan M, Ropers D, et al. Coronary computed tomography angiography with a consistent dose below 1 mSv using prospectively electrocardiogram-triggered high-pitch spiral acquisition [J]. *Eur Heart J*, 2010, 31(3):340-346. DOI:10.1093/eurheartj/ehp470.
- [21] Zhang LJ, Wang Y, Schoepf U, et al. Image quality, radiation dose, and diagnostic accuracy of prospectively ECG-triggered high-pitch coronary CT angiography at 70 kVp in a clinical setting: comparison with invasive coronary angiography [J]. *Eur Radiol*, 2015, Sep 17 [Epub ahead of print]. DOI:10.1007/s00330-015-3868-z.
- [22] Halliburton SS, Abbata S, Chen MY, et al. SCCT guidelines on

- radiation dose and dose-optimization strategies in cardiovascular CT [J]. *J Cardiovasc Comput Tomogr*, 2011, 15(4):198-224. DOI:10.1016/j.jcct.2011.06.001.
- [23] Zhang LJ, Qi L, Wang J, et al. Feasibility of prospectively ECG-triggered high-pitch coronary CT angiography with 30 ml iodinated contrast agent at 70 kVp: initial experience [J]. *Eur Radiol*, 2014, 24(7):1537-1546. DOI:10.1007/s00330-014-3157-2.
- [24] Meinel FG, Canstein C, Schoepf UJ, et al. Image quality and radiation dose of low tube voltage 3rd generation dual-source coronary CT angiography in obese patients: a phantom study [J]. *Eur Radiol*, 2014, 24(7):1643-1650. DOI:10.1007/s00330-014-3194-x.
- [25] Qi L, Meinel FG, Zhou CS, et al. Image quality and radiation dose of lower extremity CT angiography using 70 kVp, high pitch acquisition and sinogram-affirmed iterative reconstruction [J]. *PLoS One*, 2014, 9(6):e99112. DOI:10.1371/journal.pone.0099112.
- [26] Li X, Ni QQ, Schoepf UJ, et al. 70-kVp high-pitch computed tomography pulmonary angiography with 40 ml contrast agent: Initial experience [J]. *Acad Radiol*, 2015, 22(12):1562-1570. DOI:10.1016/j.acra.2015.08.026.
- [27] Zhang LJ, Zhao YE, Schoepf UJ, et al. Seventy-peak kilovoltage high-pitch thoracic aortic CT angiography without ECG gating: Evaluation of image quality and radiation dose [J]. *Acad Radiol*, 2015, 22(7):890-897. DOI:10.1016/j.acra.2015.03.007.
- [28] Duan Y, Wang X, Yang X, et al. Diagnostic efficiency of low-dose CT angiography compared with conventional angiography in peripheral arterial occlusions [J]. *AJR Am J Roentgenol*, 2013, 201(6):W906-W914. DOI:10.2214/AJR.12.10209.
- [29] Layritz C, Muschler G, Flohr T, et al. Automated attenuation-based selection of tube voltage and tube current for coronary CT angiography: reduction of radiation exposure versus a BMI-based strategy with an expert investigator [J]. *J Cardiovasc Comput Tomogr*, 2013, 7(5):303-310. DOI:10.1016/j.jcct.2013.08.010.
- [30] 张俊, 韩丹, 何波, 等. 智能最佳管电压扫描技术在双源 CT 冠状动脉成像中的应用价值 [J]. *中华放射学杂志*, 2015, 49(4):288-292. DOI:10.3760/ema.j.issn.1005-1201.2015.01.012.
- [31] Luo S, Zhang LJ, Meinel FG, et al. Low tube voltage and low contrast material volume cerebral CT angiography [J]. *Eur Radiol*, 2014, 24(7):1677-1685. DOI:10.1007/s00330-014-3184-z.
- [32] 高建华, 孙宪昶, 李剑颖, 等. 不同前置滤线器对 64 层螺旋 CT 冠状动脉成像质量及放射剂量影响的对照研究 [J]. *中华放射学杂志*, 2007, 41(8):858-861. DOI:10.3760/j.issn.1005-1201.2007.08.020.
- [33] Yin WH, Lu B, Li N, et al. Iterative reconstruction to preserve image quality and diagnostic accuracy at reduced radiation dose in coronary CT angiography: an intraindividual comparison [J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2013, 6(12):1239-1249. DOI:10.1016/j.jcmg.2013.08.008.
- [34] Fitzgibbon GM, Kafka HP, Leach AJ, et al. Coronary bypass graft fate and patient outcome: angiographic follow-up of 5,065 grafts related to survival and reoperation in 1,388 patients during 25 years [J]. *J Am Coll Cardiol*, 1996, 28(3):616-626. DOI:10.1016/0735-1097(96)00206-9.
- [35] Hausleiter J, Meyer T, Hermann F, et al. Estimated radiation dose associated with cardiac CT angiography [J]. *JAMA*, 2009, 301(5):500-5007. DOI:10.1001/jama.2009.54.
- [36] Machida H, Masukawa A, Tanaka I, et al. Prospective electrocardiogram-gated axial 64-detector computed tomographic angiography vs retrospective gated helical technique to assess coronary artery bypass graft anastomosis: comparison of image quality and patient radiation dose [J]. *Circ J*, 2010, 74(4):735-740. DOI:10.1253/circj.CJ-09-0714.
- [37] Lee YW, Yang CC, Mok GS, et al. Prospectively versus retrospectively ECG-gated 256-slice CT angiography to assess coronary artery bypass grafts--comparison of image quality and radiation dose [J]. *PLoS One*, 2012, 7(11):e49212. DOI:10.1371/journal.pone.0049212.
- [38] Kligerman SJ, White CS. Image quality and feasibility of an ultralow-dose high-pitch helical triple-rule-out computed tomography angiography acquired in the caudocranial direction [J]. *J Thorac Imaging*, 2014, 29(1):50-59. DOI:10.1097/RTI.0000000000000059.

(收稿日期:2016-01-13)

(本文编辑:刘雪松)

· 读者 · 作者 · 编者 ·

本刊“疑难病例析评”栏目征稿

中华医学杂志开辟“疑难病例析评”栏目。结构分“病历摘要”和“分析与讨论”两部分。

1. 病例选择:(1) 疑难病例,特别是涉及多学科、多领域的疑难病例。(2) 误诊且有经验教训的病例。(3) 诊断已经明确,但病情危重或有诸多并发症,治疗上甚为棘手的病例。(4) 罕见病例。(5) 其他对临床实践有指导或提示意义的病例。以上病例须最终获得明确诊断或成功治疗,临床资料应齐全,能提供实验室、影像学和(或)病理确诊证据。

2. 写作格式:文题可用主要症状、体征或诊断命题,各短语之间用一字线连接。正文分“病历摘要”和“分析与讨论”两部分。“病历摘要”部分:交代清楚患者主诉、病史(包括既往史)、作者接诊后的诊治经过等。应提供必要的实证

图片。字数以不超过 1 000 字为宜(不包括图片)。“分析与讨论”部分:要求逻辑性强,条理清楚,能较好地体现正确的临床思维,对读者的临床工作有实际借鉴意义。重点部分可采用序号标示法,以突出层次。写作上应满足以下要求:(1) 开门见山,首先说明本例需要从哪几个方面讨论;(2) 写清诊断和治疗思路,如何发现并优先处理疾病的关键问题;(3) 请将疑点、鉴别诊断要点另列出,通过什么手段排除相关疾病;(4) 给出本例的最后诊断和诊断依据;(5) 若为误诊,则总结经验教训;(6) 若为罕见病,则介绍目前国内外的最新进展;(7) 列出相关的国内外主要参考文献。字数以控制在 2 000~2 500 字为宜。